

UNIVERSIDAD ALAS PERUANAS

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

UTILIZACIÓN DE NANOTECNOLOGÍA: CEMENTO – ZEOLITA SINTÉTICA, EN LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE

PRESENTADO POR LA BACHILLER

MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

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

AREQUIPA-PERÚ

2017

A Dios Uno y Trino por su infinita misericordia para conmigo, a quien le debo la fortaleza para el cumplimiento de mis sueños y anhelos.

A nuestra madre la Virgen María.
A mis padres, Luis Rodriguez Gaona y Adelaida Vargas de Rodriguez, que en todo momento me brindaron su apoyo incondicional para la realización del presente trabajo.

A mi alma máter Universidad Alas Peruanas – Arequipa, a la Escuela Profesional de Ingeniería Civil y a toda la plana docente; quienes con sus enseñanzas impartidas me guiaron para poder llegar a culminar la carrera.

Al Ing. Jorge Yamunaque Miranda, por su iniciativa y asesoría. Al Ing. Roberto Cáceres Flores, por su guía ingenieril y apoyo para poder realizar este trabajo. A mi familia y todos aquellos que con su apoyo moral me animaron a continuar con el propósito de culminar mis estudios superiores y mi posterior titulación.

RESUMEN

La tesis de investigación que a continuación se presenta se desarrolló mediante una metodología de tipo experimental, con el uso de técnicas experimentales y analíticas a fin de hacer la comprobación que es posible la utilización de suelo arcilloso como base de un pavimento siendo este estabilizado con zeolita sintética y cemento, basado en los métodos establecidos en el Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, tomando en cuenta la sección denominada Norma CE010 – Pavimentos Urbanos.

El procedimiento aplicado logró definir las propiedades de resistencia y plasticidad que adquirió el suelo al ser mezclado con zeolita sintética y cemento, el cual consistió en agregar distintos porcentajes de cemento y zeolita sintética a las muestras de suelo; haciendo una comparación con los de un suelo – cemento en el que el contenido de cemento requerido es mayor y no recomendable al de una estabilización con zeolita sintética – cemento.

Siguiendo con la Norma CE 010 del Reglamento Nacional de Edificaciones del Perú, que exige un valor de CBR del 100% mínimo en vías arteriales y expresas y de un 80% en vías locales y colectoras, se procedió al estudio del material. El suelo se clasificó como una arcilla de alta plasticidad (CH), arrojando valores de CBR al 100% de la densidad máxima de 2.35%, un peso específico de 2.78 gr/cm³ y una densidad máxima de 1.57 gr/cm³.

Al no cumplir las especificaciones, se decidió estabilizar el suelo con zeolita sintética y cemento Portland, tomando así diferentes dosificaciones basadas en pruebas de laboratorio realizadas por la Asociación Mexicana de Ingeniería de Vías Terrestres con este material zeolítico en otros tipos de suelos, el cual nos dio un porcentaje de 1% de zeolita y de un 10% de cemento Portland para lograr el objetivo. Al realizar la prueba de resistencia a compresión con este porcentaje, se obtuvo un valor de 14.22kg/cm², siendo este óptimo para una base con tráfico intenso.

Se describen los procedimientos de obtención de una dosificación adecuada para los suelos arcillosos, así como la elaboración de testigos de esta estabilización del suelo y sus posteriores ensayos (experimentales) bajo los parámetros de norma regida dentro del Perú.

Finalmente, se dan a conocer las conclusiones de la investigación; a la vez, se exhorta a tener en cuenta las recomendaciones planteadas, junto a una línea futura de investigación.

Palabras clave: Base estabilizada, suelo con zeolita sintética, arcilla, alta plasticidad, tráfico intenso.

ABSTRACT

The research thesis presented below was developed using an experimental type methodology, with the use of experimental and analytical techniques in order to verify that it is possible to use clay soil as the base of a pavement with this stabilized with Synthetic zeolite and cement, based on the methods established in Regulation CE.010 - Pavimentos Urbanos.

The applied method managed to define the properties of resistance and plasticity that the soil acquired when being mixed with the synthetic strain and the cement, which consisted of adding different percentages of cement and synthetic zeolite to the soil samples; Making a comparison with the soil - the cement in which the required cement content is greater and not recommended for a stabilization with synthetic ceramics - cement.

Following the rules of the materials for the base Standard CE 010 of the Regulation Standard of the Peruvian editions, which requires a CBR value of 100% minimum in arterial and expressways and 80% in local and collecting roads, material. The soil was classified as a clay of high plasticity (CH), yielding CBR values at 100% of the maximum density of 2.35%, a specific gravity of 2.78 g / cm³ and a maximum density of 1.57 g / cm³.

By failing to meet the specifications, it was decided to stabilize the soil with the synthetic strain and Portland cement, taking different dosages based on laboratory tests performed by the Mexican Association of Land Roads Engineering with this zeolitic material in other types of soils, Dio A percentage of 1% zeolite and 10% Portland Cement to achieve the target. When performing the test of resistance a compression with this percentage, a value of 14.22 kg / cm² was obtained, being this optimal for a base with intense of the traffic.

The procedures for obtaining a suitable dosage for clay soils, as well as the preparation of controls of this stabilization of the soil and the (experimental) tests under the parameters of norm ruled within Peru, are described.

Finally, the conclusions of the research are announced and the call for consideration of the recommendations, together with a future line of research, is encouraged.

Key words: Stabilized base, soil with synthetic zeolite, clay, high plasticity, intense traffic.

INTRODUCCIÓN

En el sistema de diseño y de construcción convencional en obras de vías terrestres, se requiere del movimiento de una gran cantidad de materiales; tanto de importación como de exportación.

Esto se puede incrementar a volúmenes extraordinarios, especialmente en situaciones donde la capacidad de carga del suelo es muy baja como el suelo arcilloso que no es utilizado en bases de pavimentos flexibles debido a su cohesión, baja resistencia y alta plasticidad.

El empleo de estabilización química de suelos se ha convertido en una muy seria alternativa a considerar en estos momentos; la nanotecnología define las ciencias y técnicas que se aplican a un nivel de nanoescala, es decir, a unas medidas extremadamente pequeñas o nanos que permiten trabajar y manipular las estructuras moleculares y sus átomos.

Otra manera de definirla es como la ciencia del estudio, diseño, creación, síntesis, manipulación y aplicación de materiales, aparatos y sistemas a través del control de la materia a un nivel de nanoescala.

Esta estabilización a nivel nanotecnológica ofrece una alternativa en costo-efectividad más favorable que los métodos tradicionales de construcción de base y tiene la gran ventaja de utilizar los suelos del sitio de los trabajos.

Un suelo arcilloso puede ser estabilizado químicamente y a un nivel de nanoescala con el uso de las zeolitas sintéticas. Las zeolitas sintéticas están diseñadas para trabajar en conjunto con diversos compuestos alcalinos y varios activadores de patente; están específicamente desarrolladas para aplicar en la transformación de suelos para la elaboración de estructuras para las vías terrestres, como las bases de suelo- cemento - zeolitas sintéticas.

Al mezclar suelo, cemento, zeolita sintética y agua es posible disminuir la plasticidad y aumentar la resistencia en la base del pavimento flexible dándole homogeneidad en la distribución de cargas (esfuerzos y deformaciones) y gran durabilidad.

Seguidamente, les presento la organización del trabajo de investigación realizado. Comenzamos con el capítulo I, donde encontraran el planteamiento del problema y objetivos de la investigación; el capítulo II contiene información acerca del suelo arcilloso, base de un pavimento flexible y experiencias realizadas con una estabilización de suelo-cemento-zeolita sintética; en el capítulo III, tenemos las propiedades físicas y mecánicas; en el capítulo IV, se habla del método de diseño de un suelo arcilloso estabilizado con zeolita sintética y cemento portland IP así como también de los ensayos de laboratorio; en el capítulo V, determinamos el contenido óptimo de suelo arcilloso-cemento-zeolita sintética y por último en el capítulo VI, obtenemos los datos de entrada para el diseño de pavimento asfáltico en suelo estabilizado con cemento y zeolita sintética método AASHTO 93, así como también el análisis de precios unitarios del pavimento asfáltico en suelo estabilizado con cemento y zeolita sintética.

ÍNDICE

DEDICATORIA.....	I
AGRADECIMIENTO.....	II
RESUMEN.....	III
ABSTRACT.....	V
INTRODUCCIÓN.....	VII
ÍNDICE.....	IX
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIV
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XVI
CAPÍTULO I:PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	16
1.1 PROBLEMA.....	16
1.1.1. FUNDAMENTACIÓN.....	16
1.1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1.3. JUSTIFICACIÓN.....	3
1.1.4. LIMITACIONES Y RESTRICCIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	3
1.1.5. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	4
1.2.1. OBJETIVO GENERAL.....	4
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	4
1.3. HIPÓTESIS.....	5
1.4. VARIABLES.....	5
1.4.1. VARIABLE INDEPENDIENTE.....	5
1.4.2. VARIABLES DEPENDIENTES.....	5
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. GENERALIDADES.....	6
2.2. SUELO ARCILLOSO.....	7

2.2.1. DEFINICIÓN Y PROBLEMÁTICA DE LAS ARCILLAS.....	8
2.2.2. PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS.....	9
2.2.3. ESTRUCTURA MINERAL DE LAS ARCILLAS	9
2.2.4. LA CAPACIDAD DE CAMBIO DE LA ARCILLA	12
2.2.5. CARGAS SUPERFICIALES	13
2.2.6. LA CAPA DOBLE	13
2.2.7. TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS	15
2.2.8. LOS MATERIALES ARCILLOSOS EN LAS OBRAS DE CONSTRUCCIÓN.....	16
2.2.9. PROPIEDADES DE LOS SUELOS ARCILLOSOS	18
2.2.10. EFECTOS DE LOS SUELOS ARCILLOSO SOBRE LAS CONSTRUCCIONES	18
2.2.11. EFECTOS DE LAS CONSTRUCCIONES SOBRE LOS SUELOS ARCILLOSOS	19
2.2.12. TRATAMINETO DE LOS SUELOS ARCILLOSOS.....	21
2.2.12.1. PROCESO DE TRATAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS	22
2.2.12.2. SUSTITUCIÓN POR OTROS SUELOS.....	23
2.2.12.3. MEZCLA CON OTROS SUELOS.....	24
2.2.12.4. RECOMPACTACIÓN DE LOS SUELOS.....	25
2.2.12.5. CONTROL DE LAS CONDICIONES DE HUMEDAD.....	26
2.2.12.6. MEZCLA CON CONGLOMERANTES.....	28
2.2.12.7. MEZCLA CON OTROS PRODUCTOS ESTABILIZADORES.....	28
2.3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CEMENTO	29
2.3.1. EL CEMENTO PORTLAND.....	29
2.3.2. EL CEMENTO PORTLAND ADICIONADO CON ZEOLITA SINTÉTICA	36

2.4.	PAVIMENTO FLEXIBLE.....	39
2.5.	BASE DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE	40
2.5.1.	CARACTERÍSTICAS DE LA CAPA BASE DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE	41
2.6.	MECANISMO DE REACCIÓN DE LA ZEOLITA SINTÉTICA Y CEMENTO PORTLAND CON EL SUELO	41
2.7.	IMPACTO AMBIENTAL	43
2.8.	EXPERIENCIAS CON LA ESTABILIZACIÓN DE SUELO MÁS CEMENTO Y ZEOLITA SINTÉTICA	46
2.8.1.	DULLES INTERNATIONAL AIRPORT -2008 – EE.UU.....	46
2.8.2.	VERACRUZ, COATZACOALCOS – VIALIDADES INTERNAS EN EL COMPLEJO PETROQUÍMICO ETILENO XXI – MÉXICO	49
2.8.3.	PROYECTO REHABILITACION DE LA AUTOPISTA NÉSTOR GAMBETTA CALLAO – PERU	52
CAPÍTULO III : ENSAYOS REALIZADOS AL MATERIAL ARCILLOSO		55
3.1.	EXTRACCIÓN DEL MATERIAL	55
3.1.1.	PROCEDIMIENTO DE MUESTREO.....	56
3.2.	PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS	56
3.2.1.	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD	56
3.2.2.	CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE SUELO (SISTEMA SUCS)	58
3.2.3.	DENSIDAD RELATIVA DE LAS PARTÍCULAS DEL SUELO	65
3.2.4.	COMPACTACIÓN	66
3.2.5.	ENSAYO DE CBR (California Bering Ratio – ASTM D 1883)	68
CAPÍTULO IV : DISEÑO DEL SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON ZEOLITA SINTÉTICA Y CEMENTO		72
4.1.	GENERALIDADES Y COMPONENTES DEL DISEÑO DE SUELO ESTABILIZADO	72

4.1.1.	MATERIALES CEMENTANTES.....	72
4.1.2.	ZEOLITA SINTÉTICA.....	75
4.1.3.	AGUA	76
4.2.	MÉTODO DE DISEÑO DE UN SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON CEMENTO	76
4.2.1	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD ...	76
4.3.	MÉTODO DE DISEÑO DE UN SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON ZEOLITA SINTÉTICA Y CEMENTO	82
4.3.1	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD ...	82
4.4.	ENSAYOS DE LABORATORIO	86
4.4.1.	ELABORACIÓN DE LOS TESTIGOS PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SUELO - CEMENTO	86
4.4.2.	ELABORACIÓN DE LOS TESTIGOS PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SUELO – ZEOLITA SINTÉTICA – CEMENTO.....	89
CAPÍTULO V : ANÁLISIS DE RESULTADOS.....		93
5.1.	PROPIEDADES DEL SUELO ARCILLOSO NATURAL	93
5.1.1.	CLASIFICACIÓN DEL SUELO AASHTO	93
5.1.2.	GRAVEDAD ESPECÍFICA	95
5.1.3.	PROCTOR MODIFICADO.....	96
5.2.	DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DEL SUELO ARCILLOSO – CEMENTO – ZEOLITA SINTÉTICA	97
5.2.1.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DEL SUELO – CEMENTO	99
5.2.2.	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DEL SUELO – CEMENTO – ZEOLITA SINTÉTICA.....	101
5.2.3.	RELACION DE SOPORTE CALIFORNIA DEL SUELO ESTABILIZADO (CBR).....	105
5.2.4.	PROPIEDADES PLÁSTICAS DEL SUELO ESTABILIZADO	106

CAPÍTULO VI : DISEÑO Y COSTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE	107
6.1. DATOS DE ENTRADA PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL, MÉTODO AASHTO 93	107
6.1.1. DRENAJE.....	108
6.1.2. CONFIABILIDAD	109
6.1.3. SERVICIABILIDAD.....	110
6.1.4. DESVIACIÓN ESTÁNDAR.....	111
6.1.5. COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA	111
6.2. DISEÑO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO CONVENCIONAL, MÉTODO AASHTO 93.....	114
6.3. COSTO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO CONVENCIONAL	118
6.4. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO CONVENCIONAL	119
6.5. DATOS DE ENTRADA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTÉTICA MÉTODO AASHTO 93.....	127
6.6. PRESUPESTO DEL DISEÑO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTÉTICA.....	129
6.7. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTÉTICA.....	130
CONCLUSIONES	137
RECOMENDACIONES	140
BIBLIOGRAFÍA	142
ANEXO 1. Ensayos de laboratorio para el suelo arcilloso natural.....	145
ANEXO 2. Ensayos de laboratorio para la dosificación de zeolita sintética y cemento	153
ANEXO 3. Metrado para el diseño del pavimento flexible.....	175

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Composición del cemento Portland	30
Tabla 2. Determinación del contenido de humedad natural	58
Tabla 3. Propiedades físicas del cemento Portland Puzolánico tipo IP de Cemento Yura	73
Tabla 4. Porcentajes de cemento para especímenes en pruebas de durabilidad.	74
Tabla 5. Propiedades comúnmente exigidas a las mezclas de suelo – cemento.....	75
Tabla 6. Densidad máxima seca y humedad óptima para cada porcentaje de cemento en peso	78
Tabla 7. Peso del cemento por m ³ obtenido por varios investigadores	79
Tabla 8. Dosificación para distintas cantidades de cemento en pesos para la fabricación de una probeta	80
Tabla 9. Dosificación para distintas cantidades de cemento en volumen de 1m ³	82
Tabla 10. Densidad máxima seca y humedad óptima para cada porcentaje de cemento y zeolita en peso	84
Tabla 11. Dosificación para distintas cantidades de cemento y zeolita sintética en pesos para la fabricación de una probeta	85
Tabla 12. Dosificación para distintas cantidades de cemento y zeolita sintética en volumen de 1m ³	85
Tabla 13. Número de testigos para cada porcentaje de cemento	89
Tabla 14. Número de testigos para cada porcentaje de cemento y 1% de zeolita sintética	91
Tabla 15. Clasificación del suelo según AASHTO	94
Tabla 16. Gravedad específica del suelo arcilloso natural	95
Tabla 17. Ensayo de Proctor Modificado del suelo arcilloso natural	96
Tabla 18. Resistencia a la compresión del suelo estabilizado	97
Tabla 19. Relación del Soporte California (CBR) expansión a los 7 días de sumergidas en agua del suelo estabilizado con 10% de cemento y 1% de zeolita sintética	105
Tabla 20. Relación del Soporte California (CBR) a los 7 días de sumergidas en agua del suelo estabilizado con 10% de cemento y 1% de zeolita sintética	106

Tabla 21. Ensayo de Límites de Atterberg del suelo estabilizado con 10% de cemento y 1% de zeolita sintética	106
Tabla 22. Calidad de drenaje de un pavimento	108
Tabla 23. Coeficiente de bases y sub-bases	109
Tabla 24. Valores de confiabilidad recomendados por AASHTO	109
Tabla 25. Valores de desviación estándar normal de acuerdo a la confiabilidad	110
Tabla 26 Clasificación de tráfico	115
Tabla 27. Valores para el diseño del pavimento flexible convencional.....	116

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Suelo agrícola compuesto en su mayoría por arcilla expansiva.....	8
Figura 2. Esquemas básicos de las agrupaciones moleculares de las arcillas	10
Figura 3. Láminas con distintos tipos de arcillas. En la parte superior, con enlaces de hidrógeno, típica de la caolinita; en la inferior, configuración 2:1 con enlaces cationes, típica de las esmécticas	11
Figura 4. Esquema de la absorción de cationes y formación de la capa doble	14
Figura 5. Carta de plasticidad de Casagrande (CL=arcilla de baja plasticidad; CH=arcilla de alta plasticidad; MH=limo de alta plasticidad; OH=suelo orgánico de alta plasticidad).....	17
Figura 6. Efecto de saturación diferencial bajo una zona pavimentada	20
Figura 7. Ilustración de los poros en el silicato de calcio a través de las etapas de hidratación	32
Figura 8. Variación del calor durante el proceso de hidratación del cemento Portland	33
Figura 9. Diagrama esquemático de la relación de agua/cemento y la porosidad	35
Figura 10. Gráfica de resistencia del concreto en función de la relación agua/cemento	35
Figura 11. Simulación del proceso de hidratación y el efecto de cristalización “envolvente”	38
Figura 12. Sustitución y neutralización de la carga “envolvente”	39
Figura 13. Estructura de un pavimento flexible	40
Figura 14. Valores de Ph.....	42
Figura 15. Modificación del estado físico de suelos.....	44
Figura 16. Modificación del entorno físico de los suelos.....	45
Figura 17. Aeropuerto de Dulles EE.UU	47
Figura 18. Aeropuerto Internacional de Dulles EE.UU	47
Figura 19. Diseño del Pavimento estabilizado con concreto zeolítico	48
Figura 20. Resultados de laboratorio del pavimento estabilizado con concreto zeolítico	49
Figura 21. Escarificado del terreno	50
Figura 22. Esparcido de zeolita sintética en el suelo	50

Figura 23. Esparcido del cemento en el suelo	51
Figura 24. Mezclado del suelo estabilizado con zeolita sintética y cemento	51
Figura 25. Curado del suelo estabilizado con zeolita sintética y cemento	52
Figura 26. Resistencia a la compresión de suelo – cemento – zeolita sintética, Autopista Gambetta	53
Figura 27. Nivelación y compactación del material tratado con zeolita	53
Figura 28. Aplicación de cemento, mezclado, nivelación y compactación	54
Figura 29. Aplicación de la imprimación a los 2 días	54
Figura 30. Monitoreo del pavimento estabilizado con concreto zeolítico	54
Figura 31. Extracción del suelo arcilloso en el lugar donde se realizó el muestreo	56
Figura 32. Hallando el contenido de humedad natural del material	58
Figura 33. Muestra de suelo después del cuarteo para pasar por tamices	59
Figura 34. Lavado de muestra por el tamiz #200	60
Figura 35. Tamices a utilizar para la granulometría	60
Figura 36. Análisis granulométrico del suelo	61
Figura 37. Cuchara Casagrande	62
Figura 38. Límite plástico	63
Figura 39. Clasificación en el ábaco de Casagrande.....	64
Figura 40. Clasificación según AASHTO	64
Figura 41. Elaboración y proceso de prueba de la densidad de sólidos	66
Figura 42. Ensayo del Proctor Modificado	67
Figura 43. Curva de relación humedad–densidad	68
Figura 44. Elaboración de moldes para CBR.....	68
Figura 45. Medición de la expansión y penetración para hallar CBR.....	69
Figura 46. Relación esfuerzo–deformación del suelo	70
Figura 47. Relación densidad – CBR % del suelo	71
Figura 48. Curva de relación humedad–densidad al 10% de cemento	77

Figura 49. Curva de relación humedad–densidad al 12% de cemento	77
Figura 50. Curva de relación humedad–densidad al 14% de cemento	78
Figura 51. Curva de relación humedad–densidad al 6% de cemento y 1% de zeolita sintética.....	83
Figura 52. Curva de relación humedad–densidad al 8% de cemento y 1% de zeolita sintética	83
Figura 53. Curva de relación humedad–densidad al 10% de cemento y 1% de zeolita sintética.....	84
Figura 54. Elaboración de testigos del suelo estabilizado	87
Figura 55. Desmolde y tratamiento de los testigos	88
Figura 56. Testigos del suelo estabilizado con cemento	89
Figura 57. Zeolita Sintética.....	90
Figura 58. Testigos del suelo estabilizado con cemento y zeolita sintética	92
Figura 59. Suelo arcilloso natural	94
Figura 60. Prueba de la gravedad específica del suelo arcilloso natural	95
Figura 61. Ensayo de Proctor Modificado del suelo arcilloso natural	96
Figura 62. Resistencia a la compresión del suelo estabilizado a la edad de 7 días ...	97
Figura 63. Resistencia a la compresión del suelo estabilizado a la edad de 14 días	98
Figura 64. Resistencia a la compresión del suelo estabilizado a la edad de 28 días	98
Figura 65. Evolución de la resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 10%, 12% y 14% para edades de 7,14 y 28 días	99
Figura 66. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 10%, 12% y 14% para edades de 7,14 y 28 días	100
Figura 67. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 10%, 12% y 14% para edades de 7,14 y 28 días	100
Figura 68. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 6%, 8% y 10%, 1% de zeolita sintética para edades de 7,14 y 28 días	101
Figura 69. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 6%, 8% y 10%, 1% de zeolita sintética para edades de 7,14 y 28 días	102

Figura 70. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 6%, 8% y 10%, 1% de zeolita sintética para edades de 7,14 y 28 días	102
Figura 71. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 10% y 0.5%, 1%, 1.5% de zeolita sintética para edades de 7,14 y 28 días	103
Figura 72. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 10% y 0.5%, 1%, 1.5% de zeolita sintética para edad de 7 días	104
Figura 73. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 10% y 0.5%, 1%, 1.5% de zeolita sintética	104
Figura 74. Ensayo de relación de Soporte California (CBR) a 4 días de sumergidas en agua del suelo estabilizado con 10% de cemento y 1% de zeolita sintética	105
Figura 75. Coeficiente estructural de la capa de la carpeta asfáltica	112
Figura 76. Coeficiente estructural de la capa de la base granular, sin tratar	113
Figura 77. Coeficiente estructural de la capa de la base granular, estabilizada con cemento	113
Figura 78. Coeficiente estructural de la capa de la sub-base granular	114

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

1.1 PROBLEMA

1.1.1. FUNDAMENTACIÓN

Hoy en día, el principal problema en la construcción de carretera, desde un punto de vista de sustentabilidad y eficiencia, es nuestra capacidad para encontrar un enfoque más racional y duradero en su diseño y construcción.

Para lograrlo, es necesario garantizar una menor dependencia de grandes cantidades de materiales de préstamo y poder cumplir los requisitos relativos a la ejecución de la construcción de pavimentos.

Este trabajo surgió con la necesidad de poder determinar mediante una investigación si es posible la utilización de suelo arcilloso en base de pavimentos flexibles evitando así el movimiento masivo de suelo *in situ* por suelo de préstamos de canteras.

La alternativa a desarrollar está basada en una tecnología con más de 100 años de vigencia en el mundo, la cual ha sido repotenciada mediante la incorporación de lo más avanzado de la investigación Europea en nanotecnología aplicada para el desarrollo de aditivos de concreto.

1.1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es conocida la mala calidad de las arcillas, debido a que son partículas micrométricas (tipo polvo) que tienen cohesión y sufren grandes cambios al contacto con el agua; por lo mismo, su resistencia está sujeta a la humedad a la que está expuesta, por lo que no pueden ser utilizadas con fines de base de un pavimento flexible porque no cumple con los requisitos de la norma CE-010 PAVIMENTOS URBANOS.

1.1.2.1. PROBLEMAS SECUNDARIOS

- La masiva contaminación que se realiza en la construcción de nuevas vías pavimentadas es un problema que afecta al medio ambiente, se sabe que en la actualidad existe una dependencia de materiales de préstamo cuando encontramos un material *in situ* que no cumple con los requisitos que debe tener una base de un pavimento flexible según la norma Norma Técnica CE-010 - PAVIMENTOS URBANOS, como es el caso de un suelo arcilloso.
- En la actualidad, no se conoce las propiedades que podemos obtener de un suelo estabilizado con la nanotecnología; siendo esta una nueva era donde los avances científicos deben ser reflejados y utilizados en nuevos diseños y procesos constructivos que favorezcan al crecimiento de la tecnología enfocada en la construcción.
- En el Perú, el diseño de pavimentos se realiza de forma mecanicista y/o repetitiva con el uso de materiales granulares de préstamo, siendo estos la base de

nuestros pavimentos flexibles. Estos diseños se encuentran limitados ya que en ciertas zonas como en la selva no existe disponibilidad de materiales granulares; la obra eleva su costo debido a la gran cantidad de movimiento de tierras que se debe realizar.

1.1.3. JUSTIFICACIÓN

La importancia de esta investigación está ligada a que en la actualidad los impactos ambientales que genera la industria de la construcción son muy elevados; el estudio de esta nueva tecnología nos ayuda a reducir este impacto logrando modificar (trasformar) y reciclar cualquier material (suelos arcillosos) *in situ* a nivel molecular, llevando así a la metodología de construcción tradicional a un nuevo nivel y proyectar dicha área a un futuro tecnológico.

En el diseño de pavimentos flexibles en zonas con presencia de suelos arcillosos, se requiere del movimiento de una gran cantidad de materiales, tanto propio (suelo del lugar) como de préstamo (canteras); incrementando a volúmenes extraordinarios, especialmente en situaciones donde la capacidad de carga del suelo es muy baja y tiene problemas críticos de estabilidad.

También cuando hay arcillas plásticas expansivas, generan riesgos estructurales que pueden llevar a que falle la estructura antes del tiempo estimado. Como resultado de esto se diseñan pavimentos convencionales de múltiples capas y estructuras muy robustas.

Al realizar esta investigación buscamos obtener más beneficios para la población que hace uso de estos pavimentos, así como también obtener una mayor eficiencia al uso de materiales *in situ*.

1.1.4. LIMITACIONES Y RESTRICCIONES DE LA INVESTIGACIÓN

- Falta en la actualidad en el Perú normativa para el uso de suelo estabilizado, la cual determine parámetros para los ensayos y cálculo estructural del pavimento flexible con una base estabilizada. A causa de esto; el análisis se realizó según los

regimientos de la actual Norma CE.010- Pavimentos Urbanos que rige en el país hasta el momento.

- Todas las pruebas se hicieron en el laboratorio de suelos con maquinaria adecuada para obtener un mínimo porcentaje de error en los resultados.
- El presente trabajo se limita a un suelo arcilloso para base de un pavimento flexible.

1.1.5. ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

- La presente tesis abarca el tema de la utilización del suelo arcilloso como base de un pavimento flexible, debidamente estabilizado con zeolita sintética y cemento Portland.
- Dosificación adecuada de zeolita sintética y cemento Portland para poder cumplir las especificaciones que requiere una base de un pavimento flexible según el RNE.
- Uso de un suelo arcilloso, siendo este un suelo *in situ* que no genera contaminación ya que no se realizara la extracción de todo este para ser remplazado por un material de préstamo provocando contaminación del medio ambiente.

1.2. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la estabilización del material arcilloso con fines de base de un pavimento flexible utilizando la nanotecnología, suelo-cemento-zeolitas sintéticas.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Reducir la contaminación que genera la construcción de obras viales conformadas con materiales granulares (de préstamo) al trabajar con un suelo arcilloso *in situ* estabilizado con zeolita sintética y cemento como base del

pavimento flexible.

- Determinar las propiedades mecánicas del suelo estabilizado con cemento y zeolita sintética con ayuda de la nanotecnología.
- Obtener el porcentaje óptimo de cemento y zeolita sintética en el suelo arcilloso a través de la relación de su resistencia a la compresión para ser utilizado como base de un pavimento flexible, según lo requerido por la Norma Técnica CE-010 - PAVIMENTOS URBANOS.
- Analizar los beneficios económicos que genera el uso de una base conformado por un suelo arcilloso *in situ* estabilizado con cemento y zeolita sintética, en comparación a un diseño tradicional, utilizando materiales granulares de préstamo.

1.3. HIPÓTESIS

El suelo arcilloso puede ser utilizado como base en la construcción de la estructura para pavimentos flexibles, este suelo resulta adecuado una vez que sea estabilizado adicionando un porcentaje óptimo de cemento y zeolita sintética.

1.4. VARIABLES

1.4.1. VARIABLE INDEPENDIENTE

Analizar el comportamiento del suelo arcilloso cuando es estabilizado con zeolita sintética y cemento Portland.

1.4.2. VARIABLES DEPENDIENTES

Proponer una base de pavimento flexible con suelo arcilloso estabilizado con zeolita sintética y cemento portland de manera que funcione óptimamente.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. GENERALIDADES

Cada vez se hace más difícil optimizar los procesos constructivos en cuestiones de costo, plazo y calidad. La necesidad de terrenos para préstamos y canteras puede llegar a ser el factor determinante en esta optimización.

Por lo tanto, se hace cada vez más necesaria la utilización de todos los materiales que se encuentran directamente en la traza de las propias obras, sean cuales sean sus propiedades. Ello obliga a un estudio detallado de sus propiedades para así adoptar los tratamientos y medidas necesarias para lograr que su comportamiento sea satisfactorio durante la vida útil de la obra y, por supuesto, con una mejor calidad y durabilidad.

Los suelos con contenidos apreciables de arcillas y limos, presentan graves problemas geotécnicos para su empleo en la construcción de infraestructuras debido a su elevada plasticidad, reducida capacidad cortante e inestabilidad de volumen en función de la humedad (expansión y contracción).

El tratamiento y estabilización con zeolita sintética y cemento Portland de estos suelos es una solución muy interesante desde los puntos de vista económico, ambiental y técnico, citados anteriormente. En general, puede afirmarse que todo tipo de suelos con una adecuada dosificación de zeolita sintética y cemento Portland puede ser utilizado como base de pavimentos flexibles.

También es importante indicar que traería beneficios a la población que hace uso de estos pavimentos, así también obtener una mayor eficiencia al uso de los materiales *in situ*.

2.2. SUELO ARCILLOSO

Están formados fundamentalmente por arcilla. La arcilla está constituida fundamentalmente por silicato de aluminio hidratado. Es un tipo de suelo que, cuando está húmedo o mojado, resulta pegajoso; pero cuando está seco es muy fino y suave dado que la arcilla está formada por partículas diminutas menores a 0.005 mm de diámetro.

Desde un punto de vista de la textura, tiene consistencia plástica y puede ser modelado. Son suelos que para la agricultura, se conoce como suelos húmedos y pesados. Son muy impermeables dado que no dejan pasar el agua o el aire, todo ello propicia que sean suelos donde el agua se estanque con facilidad por lo que en este tipo se necesita realizar un sistema de drenaje adecuado porque después de las lluvias el agua queda retenida en la superficie. Presenta un color marrón oscuro.

Figura 1. Suelo agrícola compuesto en su mayoría por arcilla expansiva



Fuente: Elaboración propia

2.2.1. DEFINICIÓN Y PROBLEMÁTICA DE LAS ARCILLAS

Se definen como arcillosos aquellos suelos en cuya composición granulométrica tiene un peso especial las partículas pequeñas, cifradas estas en las de tamaño inferior a dos micras. Estas partículas están compuestas en su mayoría por minerales arcillosos, silicatos de hierro, aluminio, magnesio, etc., originados por la alteración química de otros minerales originales.

Esta especial singularidad en cuanto al tamaño y composición de las partículas se plasma en un comportamiento dependiente de fenómenos más cercanos a las teorías moleculares que a las macroscópicas. Adquieren así en este tipo de suelos gran relevancia conceptos como la superficie específica de las partículas, la carga de las partículas y las atracciones e intercambios iónicos, conceptos que se manejan más raramente en la caracterización y funcionamiento de los restantes materiales empleados en las obras.

2.2.2. PROPIEDADES DE LAS ARCILLAS

Las principales características que justifican el comportamiento de los materiales arcillosos pueden resumirse en su estructura mineral, la capacidad de cambio de las mismas, las cargas superficiales de las partículas de arcilla, la “capa doble” y el tamaño de las partículas que las constituyen. A continuación, se describen dichas nociones.

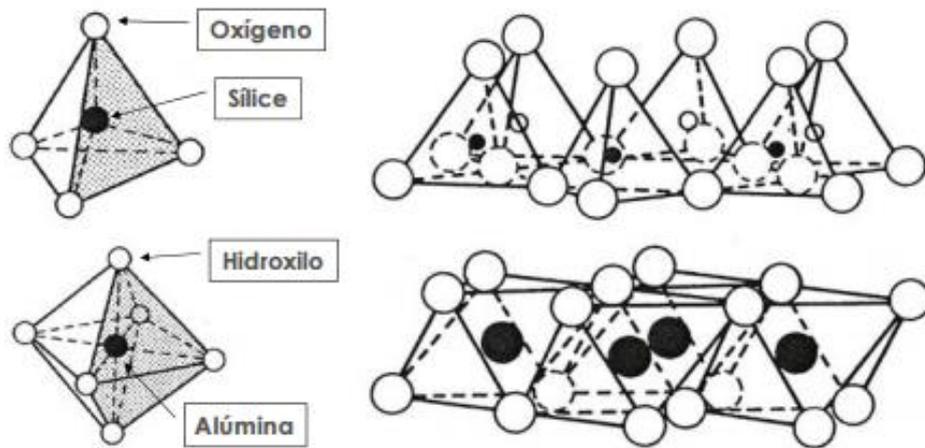
2.2.3. ESTRUCTURA MINERAL DE LAS ARCILLAS

Las partículas de arcillas se componen por agrupaciones moleculares sencillas asociadas en estructuras más o menos complejas de disposición repetitiva.

Los esquemas básicos de agrupación están formados por láminas muy delgadas de unidades de mallas tetraédricas y octaédricas. Las unidades tetraédricas se componen de iones de sílice rodeados por cuatro átomos de oxígeno equidistantes del mismo constituyendo los vértices de la forma geométrica. Las unidades octaédricas las forman seis grupos hidroxilos (OH) en los vértices rodeando a un átomo de aluminio o magnesio.

Estas unidades se combinan entre ellas compartiendo caras de los octaedros o vértices de los tetraedros para formar estructuras del tipo laminar, anular o lineal (Figura 2). Estas estructuras pueden en teoría extenderse indefinidamente en el espacio mediante la reproducción de los esquemas elementales. Las estructuras laminares son las más representativas y frecuentes de los suelos arcillosos.

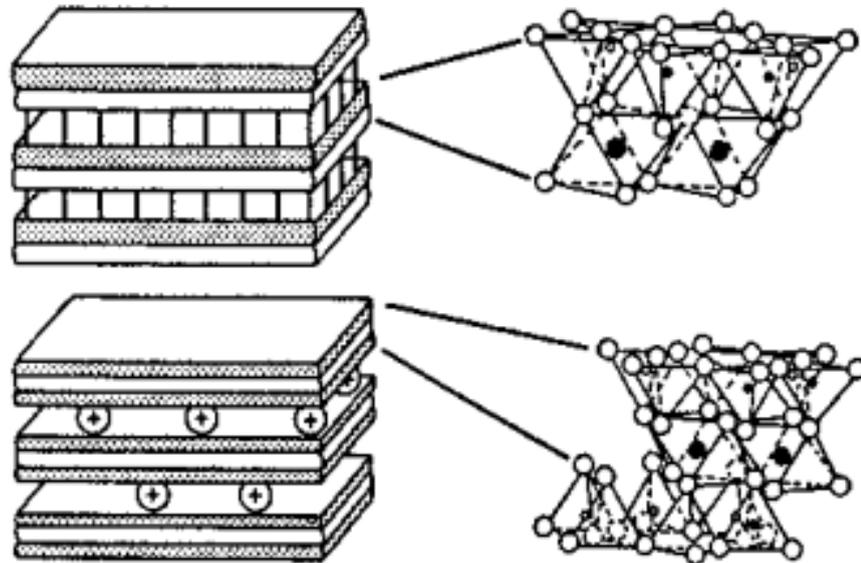
Figura 2. Esquemas básicos de las agrupaciones moleculares de las arcillas



Fuente: Little, 1995

A su vez, este esquema básico se reproduce mediante la yuxtaposición de multitud de láminas dispuestas en paralelo y unidas a su vez por enlaces de hidrógeno o cationes (Figura 2.2.3.b). Estas estructuras laminares son también típicas y repetitivas. El esquema de unión se basa en que una o varias capas de mallas octaédricas o tetraédricas comparten una de las caras o planos de átomos y agrupadas así en láminas compuestas se establecen los enlaces. En estas composiciones, las atracciones entre láminas simples son mucho más fuertes que los enlaces entre las compuestas.

Figura 3. Láminas con distintos tipos de arcillas. En la parte superior, con enlaces de hidrógeno, típica de la caolinita; en la inferior, configuración 2:1 con enlaces cationes, típica de las esmécticas



Fuente: Little, 1995

La diferencia de las fuerzas de unión en las distintas superficies de contacto justifica en parte los comportamientos que después se describirán en los suelos arcillosos.

La gran variedad de disposiciones que es posible componer basándose en las unidades básicas descritas, así como las distintas posibilidades de ubicar cationes o aniones diferentes tanto en el interior de las mallas como en los enlaces entre láminas, genera la diversidad de los minerales arcillosos que es posible encontrar en la naturaleza: Caolinitas, halloysitas, montmorillonitas (esmectitas), vermiculitas, illitas, sepiolitas, etc.

Finalmente, hay que citar que las configuraciones y estructuras que se han descrito y que constituyen las partículas de arcilla no son eléctricamente neutras y presentan un desequilibrio de las cargas. El hecho de que las agrupaciones elementales se basen en formas tetraédricas u octaédricas no significa que estén

totalmente equilibradas eléctricamente, sino que estas son las formas que minimizan las fuerzas de repulsión que puedan existir entre los átomos.

2.2.4. LA CAPACIDAD DE CAMBIO DE LA ARCILLA

Un fenómeno muy común en las estructuras laminares tetraédricas y octaédricas descritas es su propensión a la sustitución de los iones de sílice o aluminio por otros de menor carga o valencia positiva. Esto provoca una deficiencia de cargas que se refleja en una carga negativa en la superficie de la lámina. La sustitución se justifica por la aparición de cationes más afines a la estructura que los que inicialmente la componen.

Este fenómeno, que suele presentarse más frecuentemente con los cationes, hace que exista un riesgo constante de sustitución en cualquiera de las estructuras que son susceptibles de ello mientras pueda presentarse ante el mineral un catión de mayor afinidad que el previamente existente. Es lo que se conoce como la “capacidad de cambio” de los minerales arcillosos.

Dependiendo de los tipos de agrupaciones, según los iones que compongan las mallas y sus estratificaciones, habrá más o menos posibilidad de absorción de los llamados “cationes de cambio”. La gran superficie específica de las partículas arcillosas aumenta además esta posibilidad de absorción. Por otra parte, la posible rotura de las estructuras laminares en partículas pequeñas también aumenta esta propensión al provocarse en los bordes rotos la presencia de cargas desequilibradas.

La capacidad de cambio es una característica de cada tipo de mineral arcilloso. A más capacidad de cambio, más reactividad con potenciales aportadores de cationes y, consecuentemente, mayor carga negativa superficial en las partículas de la arcilla. Así ocurre con las montmorillonitas, que tienen una capacidad de cambio hasta diez veces superior a otros tipos como son las caolinitas.

Finalmente, hay que citar que un aumento del pH del entorno aumenta la capacidad de cambio de cationes de un material dado, mientras inhibe o reduce la de aniones.

2.2.5. CARGAS SUPERFICIALES

Como consecuencia de los fenómenos de desequilibrio eléctrico en las unidades elementales y del intercambio iónico en las estructuras de los suelos arcillosos, es usual que se presenten dos circunstancias con gran importancia en cuanto a su comportamiento eléctrico.

En primer lugar, en las estructuras laminares compuestas suelen quedar cargas negativas libres, o deficiencias de cargas positivas, debidas a sustituciones en las estructuras de iones, que se manifiestan en sus caras “paralelas”. Y en segundo lugar, aparecen cargas positivas o negativas en los bordes que se originan por la rotura de las láminas.

El primero de los fenómenos es característico de algunos tipos de arcillas especialmente activos, como las montmorillonitas, mientras que el segundo es casi genérico para todas las arcillas. Además, en cuanto a este segundo tipo hay que decir que a menor tamaño de partícula aumenta el nivel de cargas insatisfechas, debido esto a una mayor rotura de las grandes láminas estructurales, por tanto, un mayor número de enlaces rotos.

2.2.6. LA CAPA DOBLE

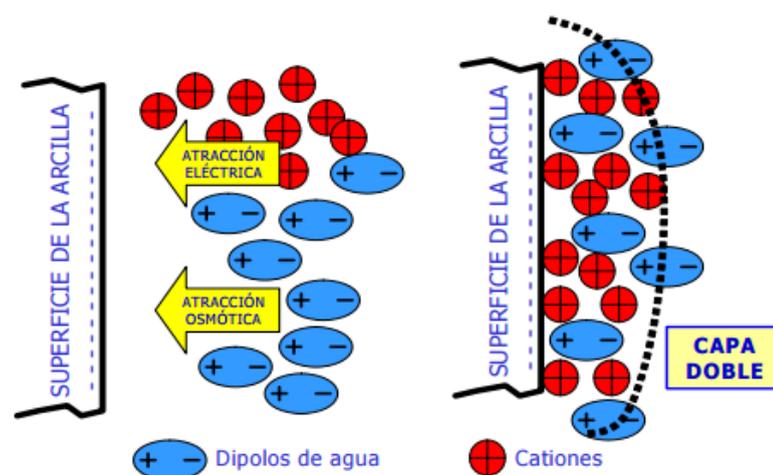
El comportamiento eléctrico superficial de las arcillas tiene como se ha visto varias consecuencias. Así, el desequilibrio de cargas superficiales descrito se neutraliza mediante la atracción de cationes externos que se sitúan en la superficie de los minerales arcillosos o entre las láminas que los componen. Esto a su vez genera una concentración salina en las mismas.

Sin embargo, la atracción de cationes a la superficie de las arcillas es un fenómeno opuesto a la tendencia de los mismos a distribuirse de manera

uniforme en el medio, evitando concentraciones diferenciales. Si la arcilla se encuentra en un medio acuoso, ante la presencia de agua libre en el contorno, esta tiende por ósmosis a aproximarse a la superficie de las partículas, cargada de cationes, para diluir su mayor contenido salino. Con ello, finalmente se consigue que los cationes se dispersen en el entorno de las partículas de manera que su concentración aumenta progresivamente en dirección perpendicular hacia su superficie. Se crea así una especie de “doble capa” eléctrica: la negativa de la superficie y la positiva proporcionada por la agrupación de cationes en su proximidad, que da nombre a este fenómeno característico de las arcillas (Figura 4).

Se puede delimitar así la capa doble como la zona que existe entre la superficie de la partícula de arcilla y la distancia a la misma en que la concentración de cationes es igual a la del medio en que se encuentran. Su espesor, por tanto, es igual a la distancia dentro de la cual existe potencial eléctrico en el entorno de la partícula. Este espesor dependerá también del tamaño relativo de los cationes en relación con su valencia o capacidad para equilibrar las cargas superficiales.

Figura 4. Esquema de la absorción de cationes y formación de la capa doble



Fuente: Adaptado de Little, 1995

El agua o medio en dicho entorno, que se encuentra unida a los iones, se encuentra bajo una fuerza de atracción conjuntamente con ellos, orientándose incluso como una molécula dipolar.

El efecto de la entrada o incorporación de agua a la capa doble provoca importantes cambios de volumen que se traducen en el conocido efecto de la expansividad de las arcillas.

2.2.7. TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS

Como ya se ha citado, los suelos arcillosos están compuestos por partículas muy pequeñas, menores de 2 micras. Una característica añadida a este tamaño y que se deduce de la estructura laminar descrita es que, además, tienen una gran superficie específica en relación con los restantes materiales.

Así, es usual hablar de superficies específicas de hasta varias centenas de metros cuadrados por cada gramo de material.

Esto hace que cualquier fenómeno o propiedad que afecte a su contorno o superficie, como los que se han descrito, adquiera especial relevancia en el estudio de las arcillas.

Pero también hay que citar que el tamaño de las partículas está condicionado por los enlaces y cargas eléctricas entre las unidades y láminas que las componen, por lo que es característica de cada tipo de arcilla.

Así, se ha citado que los enlaces de cationes suponen conexiones bastante más débiles; por ejemplo, que las uniones entre láminas que comparten planos de átomos. Como consecuencia, aquellas arcillas con alta capacidad de cambio, en las que el desequilibrio de cargas ha llevado a una alta concentración de cationes en su superficie que configurará la unión entre capas, tendrán unas fuerzas de unión entre las mismas relativamente débiles.

Por tanto, el riesgo de rotura de enlaces y fraccionamiento de partículas es mayor.

Es el caso de las montmorillonitas; tienen una alta capacidad de cambio, muy superior a las caolinitas. Por ello, el tamaño medio de sus partículas es bastante inferior y, además, la superficie específica muy superior.

2.2.8. LOS MATERIALES ARCILLOSOS EN LAS OBRAS DE CONSTRUCCIÓN

Evidentemente cuando en una construcción se emplea o afecta a un suelo este suele estar compuesto por una serie de materiales más o menos dispares que hacen que casi nunca se presente, por ejemplo, una arcilla en estado puro. Es usual encontrar suelos compuestos o agrupaciones, por ejemplo, limoso-arcillosas, arcillo-arenosas, etc.

En función de la proporción dominante en cada suelo, sus características estarán más o menos condicionadas por uno u otro material; presentando así comportamientos más o menos elásticos, cohesivos, drenantes, etc., según la fracción principal.

Cuando en un suelo la fracción condicionante es la de partículas arcillosas, sus propiedades físicas y mecánicas a escala macroscópica están dominadas por las características de estas partículas que se han descrito anteriormente. Dado que no es usual la realización de reconocimientos microscópicos sobre los materiales, la clasificación de un suelo se hace frecuentemente mediante el análisis de este comportamiento. Por ello se emplean para la identificación de suelos, los ensayos en los que más influyen estas características, que indican casi de manera inequívoca el riesgo o la presencia de los fenómenos descritos.

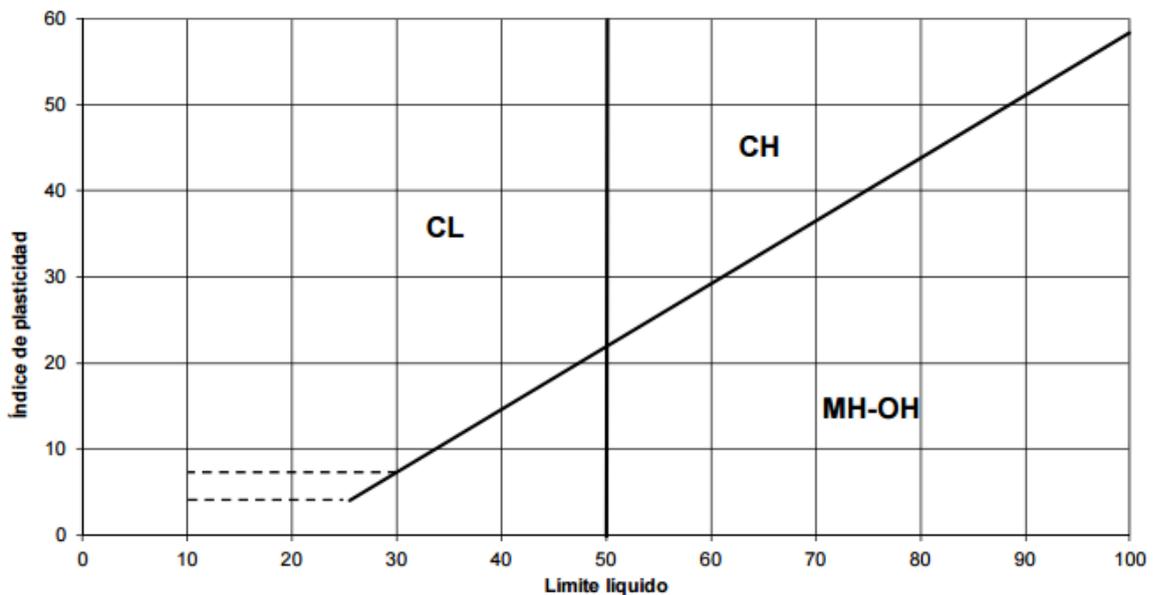
Ensayos que usualmente sirven para clasificar los suelos son el análisis granulométrico y en especial de las fracciones dominantes de grava, arena y finos; las determinaciones de plasticidad mediante los límites de Atterberg; los

ensayos de potencial de hinchamiento; los ensayos químicos sencillos y los ensayos de compactación.

En base a ellos se establecen la mayoría de las clasificaciones de suelos que hoy en día se emplean para las obras de infraestructuras y edificación.

Una primera aproximación a la caracterización de los suelos, en especial la identificación de los suelos arcillosos, es la clasificación conocida como Casagrande. En ella, partiendo de los resultados de la determinación de los límites de Atterberg, se clasifican los suelos según se recoge en el ábaco siguiente:

Figura 5. Carta de plasticidad de Casagrande (CL=arcilla de baja plasticidad; CH=arcilla de alta plasticidad; MH=limo de alta plasticidad; OH=suelo orgánico de alta plasticidad)



Fuente: Juan Diego B., 2015

En él se tiene una primera selección que indica cuáles son los suelos que se pueden considerar como arcillosos (tipo "C") sobre los que los fenómenos estudiados tienen especial influencia.

2.2.9. PROPIEDADES DE LOS SUELOS ARCILLOSOS

Las principales peculiaridades de los suelos arcillosos en su comportamiento macroscópico como material estructural derivadas de su estructura y composición se pueden resumir en los siguientes puntos:

- Comportamiento diferente según el nivel de humedad.
- Afinidad por el agua, manifiesta en mayor o menor grado según su mineralogía.
- Inestabilidad volumétrica.
- Baja resistencia y capacidad portante.
- Baja permeabilidad.
- Compresibilidad dependiente del tiempo de aplicación de la carga.

2.2.10. EFECTOS DE LOS SUELOS ARCILLOSO SOBRE LAS CONSTRUCCIONES

Como consecuencia de estas características y vistas las funciones que los suelos arcillosos adquieren en las obras de construcción, es posible identificar una serie de efectos sobre las mismas que se producen de manera directa. Fundamentalmente se pueden clasificar según sigue:

- Perturbación de los procesos constructivos que se manifiesta en falta de trabajabilidad, dificultades para el drenaje, y sensibilidad a las condiciones meteorológicas desfavorables.
- Introducción de incertidumbres en la estimación de resistencias, dado que normalmente un incremento en las condiciones de humedad suele repercutir en el reblandecimiento de los suelos y la disminución de su resistencia.
- Incremento de los movimientos diferidos o de consolidación debido a la dificultad para eliminar el exceso de agua bajo situaciones de modificación de cargas por su baja permeabilidad.

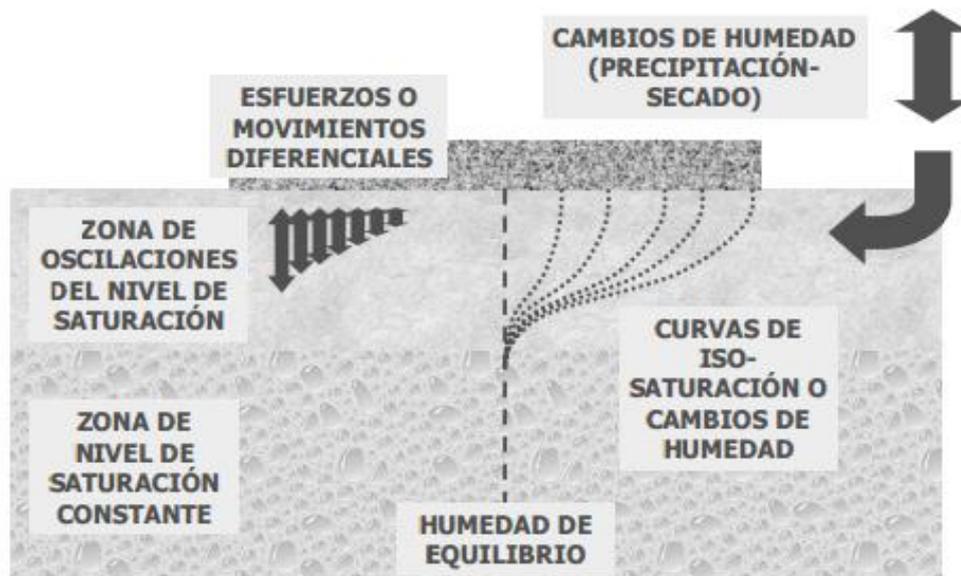
- Movimientos asociados a cambios volumétricos por diferencias de humedad, que pueden originarse por causas naturales, como cambios en el nivel freático o en las condiciones atmosféricas del entorno, o artificiales, por el reajuste de las humedades empleadas en el proceso constructivo a las condiciones ambientales finales.
- Deformaciones plásticas del asiento de las construcciones.
- Erosión y degradación de su superficie a la intemperie, manifestados por los cuarteos y agrietamientos característicos de ciclos de sequedad y humedad, que afecta negativamente a su durabilidad y estabilidad.

2.2.11. EFECTOS DE LAS CONSTRUCCIONES SOBRE LOS SUELOS ARCILLOSOS

Es posible identificar unos efectos indirectos o inducidos por las construcciones que hacen que los efectos anteriormente mencionadas se amplifiquen en su magnitud o se compliquen. Ello se debe a que las construcciones producen sobre los suelos en que se asientan o que las circundan, fenómenos que se pueden agrupar en:

- Variación de las condiciones de contorno por cambios en la geometría que alteran los espesores naturales de los estratos de manera diferencial, en especial por excavaciones como las producidas en sótanos y desmontes a media ladera.
- Cambios en las condiciones de drenaje originados por la impermeabilización de la superficie de contacto de los suelos parcial o totalmente con el ambiente exterior. Es lo que se conoce como el “efecto de borde” cuya ilustración más evidente se produce en la construcción de una zona pavimentada impermeable sobre un suelo arcilloso, que genera zonas centrales y de borde de comportamiento diferenciado ante cambios de humedad.

Figura 6. Efecto de saturación diferencial bajo una zona pavimentada



Fuente: Juan Diego B., 2015

- Cambios en el drenaje por la apertura de nuevas superficies de contacto con el exterior. Este efecto, originado fundamentalmente en las excavaciones, genera el secado de capas profundas y su exposición a las condiciones meteorológicas.
- Cambios en las tensiones provocados por la descompresión del terreno, fundamentalmente por excavación, lo que puede inducir levantamientos por el efecto de descarga.
- Variaciones en el equilibrio hídrico (succión), como la que suele producirse cuando en una excavación se elimina la capa activa. Esto provocará una desecación en la franja superior de la rasante final para generar una nueva capa activa y que rompa la estabilización de condiciones que pudiera haberse alcanzado en una zona del sustrato.
- Incrementos de humedad por filtraciones: este efecto, que en ocasiones es no deseado y en otras es de alguna manera intencionada, provoca la entrada de agua en los materiales en mayor medida que la que existía antes de la construcción a través de vías preferentes o localizadas. Suele originarse en casi todo tipo de obras y ejemplos comunes son:

- Firmes y pavimentos: Grietas, juntas calzada-arcén, medianas, cunetas, obras de drenaje deficientes, etc.
- Edificios y zonas urbanizadas: Las redes de saneamiento y alcantarillado, sótanos, jardines, etc.
- Muros: Las grietas en el relleno, drenajes en trasdoses, etc.

2.2.12. TRATAMIENTO DE LOS SUELOS ARCILLOSOS

La presencia de suelos arcillosos, frecuentemente inevitable, suele ocasionar una serie de problemas y riesgos sobre las construcciones que el técnico proyectista o director de unas obras debe evitar o, al menos, atenuar.

Las formas de actuar ante la presencia de materiales problemáticos en el subsuelo suelen agruparse en tres grandes grupos de medidas, una vez que se ha comprobado la imposibilidad de cambiar el emplazamiento de la obra o que su coste es superior al daño o efecto a evitar. Estas son la eliminación o sustitución de los materiales, ya en su totalidad ya parcialmente, por materiales aptos o menos sensibles; la modificación o tratamiento de los suelos mediante diversos mecanismos para hacerlos menos sensibles a los agentes que le hacen comportarse deficientemente; y la modificación de la tipología estructural para evitar que los efectos del comportamiento de dichos materiales afecten a la misma.

Sin embargo estas soluciones, en la mayoría de las ocasiones, no consiguen eliminar el efecto nocivo en su totalidad. Bien, porque no es posible sustituir todo el material, no es rentable o justificable la modificación del mismo o de la estructura hasta los extremos precisos; la realidad es que las soluciones citadas y que se describirán a continuación suelen constituir tan solo paliativos parciales. Por ello, es preciso pensar en estas medidas como actuaciones de tipo más preventivo que correctivo y que se aplican casi siempre de forma combinada.

2.2.12.1. PROCESO DE TRATAMIENTO DE SUELOS ARCILLOSOS

Los dos primeros grandes grupos de soluciones citados anteriormente incluyen todas las posibles actuaciones que conllevan la manipulación de los suelos para su adaptación a las necesidades constructivas. En estos grupos se centra la presente tesis.

Los principales mecanismos que se aplican para el tratamiento de los suelos arcillosos y la reducción de sus efectos perjudiciales sobre las construcciones se pueden agrupar en actuaciones mediante procesos físicos o procesos químicos. Los más frecuentes son:

- Procesos físicos
 - Sustitución por materiales menos sensibles
 - Mezcla con otros materiales.
 - Recompactación de los suelos.
 - Control de las condiciones de humedad.

- Procesos químicos
 - Mezcla con conglomerantes.
 - Mezcla con otros productos estabilizadores.

Con la salvedad de la sustitución de suelos y el control del drenaje, el resto de las soluciones persiguen de una u otra manera modificar la masa del suelo arcilloso para convertirla en otra masa más rígida bien por la modificación de la disposición de las partículas bien por modificación de sus uniones.

Existen otros mecanismos como pueden ser las inyecciones volumétricas o el tratamiento eléctrico mediante ósmosis que por su limitada aplicación no son objeto de este apartado más allá de su simple mención.

A continuación se describen someramente los procesos mencionados como paso de entrada al tema que afecta en más profundidad este documento

que es la estabilización de suelos mediante la mezcla con cemento y zeolita sintética.

2.2.12.2. SUSTITUCIÓN POR OTROS SUELOS

En ocasiones existe la posibilidad de la eliminación de los suelos arcillosos más allá del nivel que la explanación exige.

En estos casos la solución más intuitiva y fácil para evitar los problemas de los suelos arcillosos es la sobreexcavación, remoción y sustitución de los mismos por materiales menos sensibles. Sin necesidad de recurrir a materiales selectos, esta sustitución será efectiva en cuanto se eliminen no todos los efectos de los suelos arcillosos, sino los que afectan a la estructura a construir.

Pero esta posibilidad no siempre se plantea en las obras. Con frecuencia existen limitaciones económicas, medioambientales o incluso técnicas que limitan este recurso. Es el caso de obras pequeñas, de obras en zonas protegidas en las que es difícil encontrar un vertedero o un préstamo adecuado para la sustitución o, por ejemplo, de obras en las que los suelos arcillosos se encuentran bajo el nivel freático y esto complica su extracción.

Además, como ya se ha comentado, también es frecuente que la potencia o espesor de las capas de suelos arcillosos bajo o junto a las construcciones sea superior a la que es viable eliminar. En este caso, habría que estudiar el espesor mínimo efectivo que es preciso sustituir para hacer realmente efectiva la actuación.

Ejemplos de sustitución son las sobreexcavaciones bajo cimentaciones de edificios y terraplenes que se rellenan posteriormente de materiales granulares, escolleras, etc. para mejorar las condiciones de cimentación o trabajabilidad de las obras.

También se podría considerar una sustitución la coronación de un terraplén por un material mejor cuando el núcleo de dicho terraplén se ha construido con suelos arcillosos.

2.2.12.3. MEZCLA CON OTROS SUELOS

Una segunda solución frecuente para la problemática de los suelos arcillosos es su mezcla mecánica con otro tipo de suelos para modificar sus características.

Estas mezclas suelen realizarse con suelos arenosos o, en general, granulares ya que son los que en mejor medida pueden corregir los efectos de las arcillas. El proceso se basa fundamentalmente en la alteración granulométrica del suelo mediante la adición de partículas gruesas y la consiguiente dilución del efecto de las partículas finas características de las arcillas.

Con estas mezclas, convenientemente estudiadas y diseñadas, se eliminan fundamentalmente los efectos de plasticidad y de higroscopicidad que afectan al comportamiento mecánico de los suelos arcillosos y, en especial, a su dependencia del nivel de humedad. También se aumenta con este efecto el componente de fricción o rozamiento entre partículas que contribuye a la capacidad portante o resistente de los suelos. Este componente es menos sensible a la presencia de agua que la cohesión entre partículas, por lo que otro de los efectos conseguidos es una mayor resistencia y más estabilidad de la misma.

Este mecanismo es bien conocido en el campo agrícola para la mejora de fincas y en la construcción de vías y pistas rurales en las que la única tecnología disponible es la maquinaria agrícola de gradeo y extensión de tierras y el único material asequible es el suelo, de mejor o peor calidad.

La mezcla como mecanismo a gran escala puede, sin embargo, emplearse incluso mediante su realización en centrales fuera de la obra para conseguir mejores condiciones de homogeneidad y mezclado.

2.2.12.4. RECOMPACTACIÓN DE LOS SUELOS

En ocasiones, los efectos perjudiciales de los suelos arcillosos se deben a una estructura o disposición en cierto modo disgregado o poco denso que no permite su empleo o uso como asiento de construcciones. Esto puede deberse a la propia descompresión del terreno por la excavación, a su meteorización por la exposición ambiental o, sencillamente, a que las condiciones de preconsolidación en las que se encuentra el material no son adecuadas.

A veces basta como solución o actuación, ante dicha disgregación, la densificación mediante la recompactación del material para modificar su estructura y comportamiento. Esto hace que el material obtenido sea menos compresible, más resistente, por tanto, menos deformable que el inicialmente presente.

Sin embargo, esta actuación es delicada porque los efectos que logren son contrarios a los perseguidos si no se controla correctamente. Así, si un material arcilloso se compacta en exceso; se llega a obtener una reorientación de la estructura existente, dando lugar a otro laminar muy estratificado en caras paralelas a la de la compactación. Estas estructuras suelen ser mucho más sensibles a los efectos de atracción de agua, por tanto, a los posibles hinchamientos y efectos perjudiciales posteriores.

Por ello, los niveles de recompactación de suelos arcillosos suelen requerir un estudio específico para determinar las condiciones de humedad y energía de compactación que minimizan su sensibilidad posterior.

Otra singularidad de las arcillas es que su baja permeabilidad condiciona los tiempos de efectividad de los procesos de compactación. Por ello, el estudio

anterior debe contemplar lo que se conoce como el proceso de consolidación bajo el mecanismo de compactación que se aplique.

Los métodos empleados para la recompactación de suelos arcillosos son a veces singulares dadas las características especiales de los mismos. Así, incluso la propia compactación mecánica suele realizarse empleando rodillos especiales del tipo conocido como “pata de cabra” dotados de protuberancias que facilitan la salida del agua y concentran las tensiones transmitidas. Otros métodos singulares son el empleo de impactos rápidos de alta energía, mediante golpeo con maza o explosivos, o incluso la compactación que podría llamarse natural o precarga a medio plazo mediante la sobrecarga a niveles superiores a los estrictamente precisos para acelerar la consolidación.

Mención especial requiere el caso de la recompactación de los suelos arcillosos para su impermeabilización superficial. Esta solución, que encaja tanto en este epígrafe como en el siguiente persigue, fundamentalmente aprovechar las condiciones de continuidad y limitación de poros y huecos que presentan las arcillas bajo ciertos niveles de densidad.

2.2.12.5. CONTROL DE LAS CONDICIONES DE HUMEDAD

Una de las soluciones más frecuentes en la construcción para la limitación de los efectos nocivos de los suelos arcillosos consiste en actuar sobre el entorno para intentar controlar sus condiciones de humedad.

Esto se debe además a que como ya se ha citado casi nunca puede evitarse que queden materiales sin corregir y sobre ellos se adoptan estas medidas paliativas.

El principio de este mecanismo de actuación se basa en mantener constantes las características de las arcillas manteniendo fijo su nivel de saturación. En efecto, en ocasiones el problema no es la baja capacidad portante, las deformaciones excesivas o la inestabilidad por sí mismas; sino el riesgo de la variabilidad del comportamiento de las arcillas ante las modificaciones en su saturación.

Para ello, lo que suele hacerse en las obras es controlar el flujo de agua desde el exterior de la misma hacia la parte que afecta a la construcción. Y este control se puede realizar, fundamentalmente, mediante captaciones o mediante barreras que impidan el acceso de los flujos.

Ejemplos de soluciones de este tipo son:

- Drenajes mediante zanjas perimetrales en construcciones junto a laderas o taludes.
- Drenajes transversales en terrenos sometidos al agua en su superficie (firmes).
- Impermeabilización de masas de suelo arcilloso mediante láminas y membranas.
- Impermeabilización mediante capas de materiales en su coronación.
- Impermeabilización de taludes.
- Impermeabilización de recintos en profundidad mediante pantallas de inyecciones.

Un caso especial de la corrección de las condiciones de humedad es el drenaje de las masas arcillosas para permitir la salida del agua intersticial que se ubica entre las partículas ante eventuales incrementos de la presión. Esta solución, si bien se ejecuta mediante la modificación de las condiciones de drenaje, puede enmarcarse entre las que en el apartado anterior persiguen la recompactación o densificación de los suelos. Este mecanismo es el principio que gobierna los drenajes verticales mediante pilotes de grava o bandas drenantes empleados para el control de la consolidación en suelos arcillosos ante cargas verticales.

2.2.12.6. MEZCLA CON CONGLOMERANTES

El mecanismo del tratamiento de los suelos arcillosos mediante la adición de productos conglomerantes es quizás una de las soluciones tecnológicamente más avanzadas, pero también una de las más caras.

Quizás por ello su empleo se ha restringido hasta la fecha a grandes obras públicas o actuaciones singulares en las que el papel de los suelos tratados excedía de ser un simple sustrato de apoyo de construcciones y pasaba a adquirir responsabilidad estructural. Este es el caso de las capas de firmes de suelos estabilizados.

Las soluciones más frecuentes en este tipo de actuación son las que se conocen genéricamente como estabilizaciones, desarrolladas además con conglomerantes hidráulicos del tipo de la cal y el cemento. El principio de estos tratamientos se basa en la alteración del comportamiento de las arcillas mediante fenómenos de intercambio iónico y de modificación física de la estructura de sus partículas por las peculiaridades que tanto la cal como el cemento desarrollan en su contacto con las mismas y con el medio en que se mezcla, el agua. Se consigue así unificar en un solo mecanismo gran parte de los efectos que se han estudiado en los anteriores, añadiendo los procesos químicos beneficiosos.

Se añade a estos mecanismos, el efecto conglomerante a medio o largo plazo que el cemento tiene y que aporta una rigidez a la mezcla muy superior a la del suelo primitivo.

Dado que la mezcla con cemento y zeolita sintética es el objeto de este documento, no se tratará en mayor extensión en este apartado esta solución.

2.2.12.7. MEZCLA CON OTROS PRODUCTOS ESTABILIZADORES

Finalmente, hay que citar que existen ciertos tratamientos conocidos también como estabilizaciones mediante la adición de compuestos químicos que

modifican fundamentalmente el comportamiento eléctrico de las arcillas y su susceptibilidad al intercambio iónico, reduciendo por tanto sus riesgos.

Un ejemplo es el uso de productos de floculantes que convierten al suelo en hidrófobos. También se pueden incluir aquí los ligantes hidrocarbonados en forma de emulsiones.

Su uso es muy limitado, además, los efectos que se obtienen no parecen especialmente perdurables, por lo que su aplicación no se ha extendido con la rapidez que podría derivarse de unas ventajas inicialmente tan atractivas.

Fundamentalmente, se han usado para el sellado y tratamiento de superficies de caminos o pistas rurales construidas con materiales cohesivos o arcillosos.

También podemos mencionar el uso de la zeolita sintética el cual aún no es conocido y es el motivo por el cual hacemos estudio de sus propiedades en esta tesis para que forme parte de la solución en la estabilización de suelos arcillosos.

2.3. ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CEMENTO

2.3.1. EL CEMENTO PORTLAND

El cemento Portland necesita agua para hidratarse y endurecer, así convertirse en un aglutinante efectivo de otros materiales apropiados tales como los agregados pétreos. Cuando este se seca, en realidad detiene su endurecimiento. Si en la mezcla no hay suficiente agua y no se le da el curado adecuado, no va a reaccionar debidamente; generando agrietamientos y reduciendo significativamente sus propiedades.

La reacción del agua y las proporciones que se usen con el cemento Portland son de suma importancia para lograr las propiedades buscadas en el diseño de la mezcla y conseguir que estas reacciones puedan continuar durante varios años.

El cemento Portland está formado por cinco componentes principales y unos cuantos compuestos más de menor importancia. La composición, los porcentajes de peso y la fórmula química del típico cemento Portland se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Composición del cemento Portland

COMPOSICIÓN	% EN PESO	FÓRMULA QUÍMICA
Silicato Tricálcico	50%	3 CaO ₂ SiO ₂
Silicato Dicálcico	25%	2 CaOSiO ₂
Aluminato Tricálcico	10%	3 CaOAl ₂ O ₃
Aluminoferrito Tetracálcico	10%	4 CaOAl ₂ O ₃ Fe ₂ O ₃
Sulfato de Calcio (Yeso)	5%	CaSO ₄ 2H ₂ O

Fuente: Ing. Robin y Christophe, 2014

Cuando se le añade agua al cemento Portland, cada uno de los compuestos se somete a la hidratación, lo cual conlleva al producto final. Únicamente los silicatos de calcio contribuyen al endurecimiento. El silicato tricálcico es responsable de la mayor parte de la resistencia temprana (primeros 7 días). El silicato dicálcico, que reacciona lentamente, contribuye únicamente a la resistencia en tiempo posterior.

La ecuación para la hidratación del silicato tricálcico está dado por:

Silicato tricálcico + agua → silicato de calcio hidratado + hidróxido de calcio + calor



Tras la adición de agua, el silicato tricálcico reacciona rápidamente para liberar iones de calcio, iones de hidróxido y una gran cantidad de calor. El pH aumenta con rapidez a más de 12 debido a la liberación de iones de hidróxido

(OH-) de carácter alcalino. Esta reacción de hidrólisis inicial se reduce rápidamente después que comienza, dando lugar a una disminución en el calor generado.

La reacción continúa lentamente, produciendo iones de calcio y de hidróxido, hasta que el sistema se satura. Una vez que esto ocurre, el hidróxido de calcio comienza a cristalizarse. Simultáneamente, el silicato calcio hidratado se empieza a formar. Dichos iones se precipitan fuera de la solución, acelerando la reacción del silicato tricálcico a iones de calcio e hidróxido. (Principio de Le Chattier). Es entonces, que la generación de calor se incrementa dramáticamente de nuevo.

La formación de los cristales del hidróxido de calcio y del silicato de calcio hidratado, proporcionan “semillas” que pueden formar más silicato de calcio hidratado. Los cuales crecen más gruesos, lo que hace más difícil para las moléculas de agua alcanzar el silicato tricálcico de anhidro.

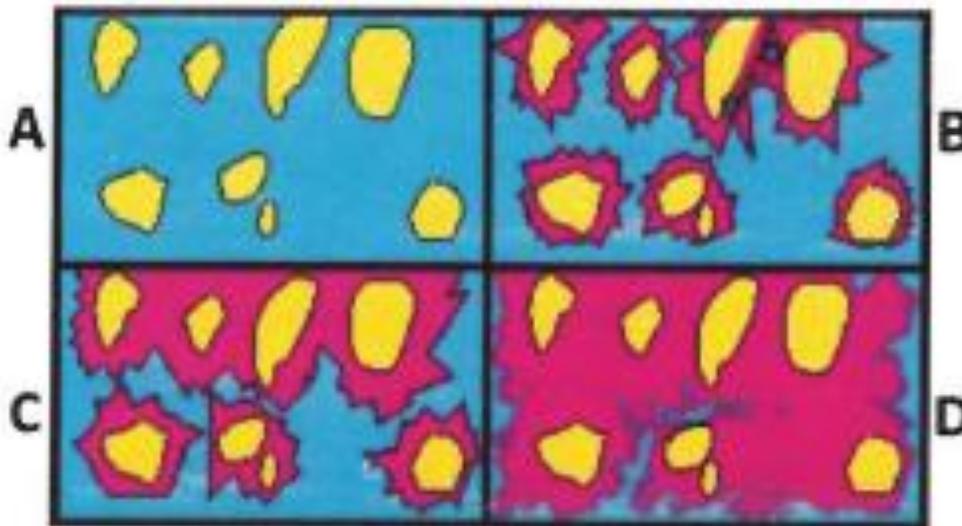
La velocidad de la reacción ahora está controlada por la rapidez a la cual las moléculas de agua se difunden a través del revestimiento del silicato de calcio hidratado.

Esta capa de revestimiento se hace más espesa con el tiempo, provocando que la producción del silicato de calcio hidratado sea más y más lenta. En la Fig.7, se muestra un diagrama en el cual se representa la formación de poros, cuando el silicato de calcio hidratado se forma. Nótese las siguientes observaciones:

- A. La hidratación aún no ha ocurrido y los poros, espacios vacíos entre los granos están llenos de agua.
- B. Se representa el inicio de la hidratación.
- C. La hidratación continúa. A pesar que todavía existen espacios vacíos, estos son llenados con agua e hidróxido de calcio.

D. Se muestra la mezcla de cemento casi endurecido. Se observa que la mayoría del espacio ya está lleno de silicato de calcio hidratado y lo que no se llenó con este hidrato endurecido es principalmente la solución de hidróxido de calcio. La hidratación va a continuar en tanto el agua esté presente y todavía haya compuestos Anhidros en la pasta del cemento (Fig.7).

Figura 7. Ilustración de los poros en el silicato de calcio a través de las etapas de hidratación



Fuente: Ing. Robin y Christophe, 2014

El silicato dicálcico también afecta a la resistencia del concreto a través de su hidratación. El cual reacciona con el agua de una manera similar al silicato tricálcico, pero más lentamente. El calor liberado es menor que el generado por la hidratación del silicato tricálcico, porque el silicato dicálcico es menos reactivo. Los productos provenientes de la hidratación del silicato dicálcico son los mismos que los del silicato tricálcico.

La ecuación para hidratación del silicato dicálcico está dado por:

Silicato dicálcico + agua → silicato de calcio hidratado + hidróxido de calcio
+ calor



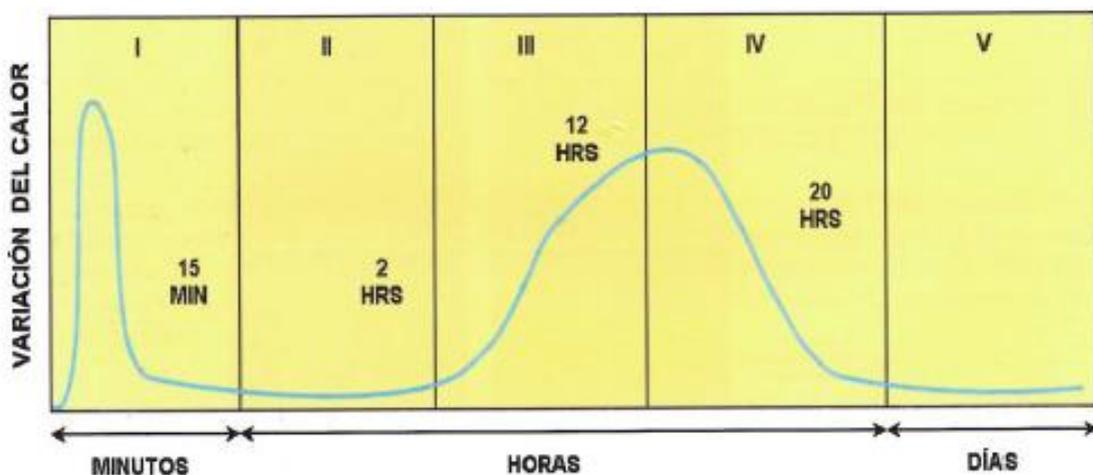
Los otros componentes del cemento portland, aluminato tricálcico y aluminoferrito tetracálcico, también reaccionan con el agua. Su química de hidratación es más complicado ya que involucran reacciones con el sulfato de calcio (yeso). Debido a que estas reacciones no contribuyen significativamente a la resistencia, no serán tomadas en cuenta en esta ocasión.

Aunque hemos tratado la hidratación de cada compuesto del cemento de forma inmediata, esto no es completamente preciso. La rapidez en la hidratación de un compuesto puede ser afectado por la variación de la concentración de otro. En general, la velocidad de hidratación durante los primeros días, clasificados del más rápido al más lento son:

Aluminato tricálcico > silicato tricálcico > aluminoferrito tetracálcico > silicato dicálcico

El calor se va incrementando con la hidratación del cemento Portland. Esto debido al rompimiento de enlaces químicos durante la hidratación. Las variantes de calor generado en diferentes etapas se muestran en función al tiempo (Fig.8).

Figura 8. Variación del calor durante el proceso de hidratación del cemento Portland



Fuente: Ing. Robin y Christophe, 2014

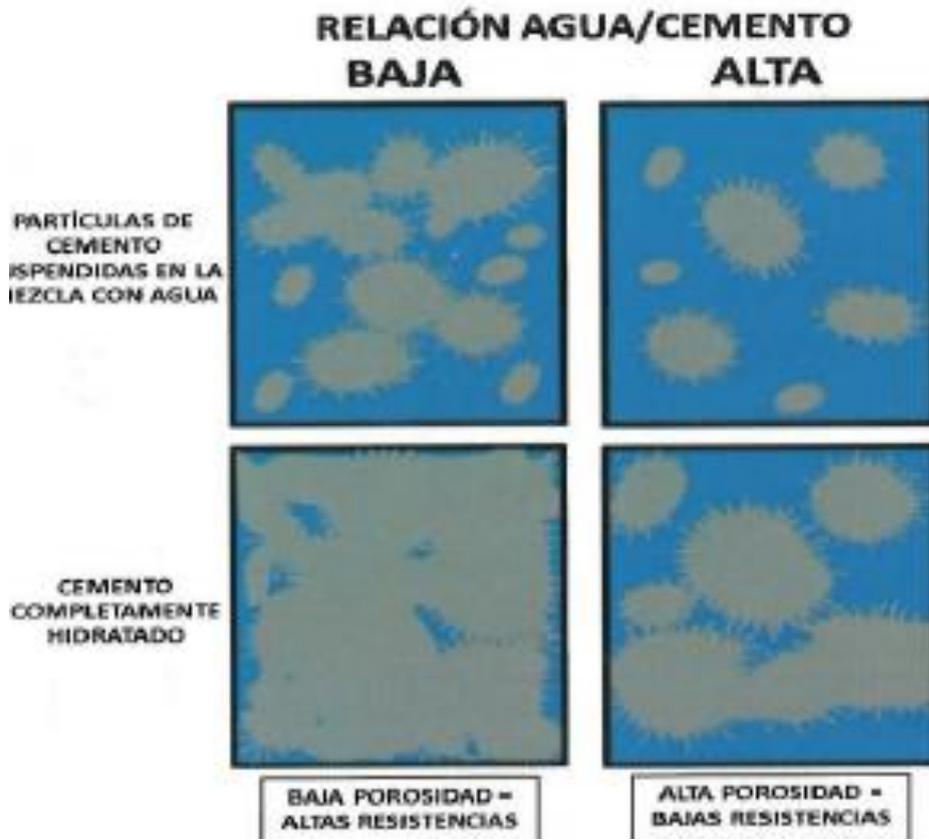
- En la Etapa I la hidrólisis de los compuestos del cemento ocurre rápidamente con aumento de la temperatura de varios grados.
- La Etapa II se conoce como el periodo de reposo. Las variaciones de temperatura disminuyen dramáticamente en esta etapa. Este periodo puede durar de una a tres horas. Durante este periodo, el concreto Portland se encuentra en un estado plástico (maleable) el cual permite que la mezcla pueda ser transportado y colocado sin dificultad. Esto es particularmente importante para la industria de la construcción ya que el concreto Portland se tiene que transportar hasta el sitio de trabajo. Es al final de esta etapa que comienza el fraguado.
- En las etapas III y IV, el concreto comienza a endurecerse y la variación de calor se incrementa nuevamente debido principalmente a la hidratación del silicato tricálcico.
- La etapa V es alcanzada después de 36 horas. Se produce una lenta formación de productos hidratados y esta continúa en tanto el agua y los silicatos anhidros estén presentes.

La resistencia de los componentes aglutinantes del cemento Portland depende en gran parte, de la reacción agua/cemento y del proceso de hidratación que acabamos de comentar.

El agua desempeña un papel fundamental, particularmente la cantidad utilizada. La resistencia de los componentes se incrementa, cuando se utiliza una menor cantidad de agua. La reacción de hidratación por sí misma, consume una determinada cantidad de agua.

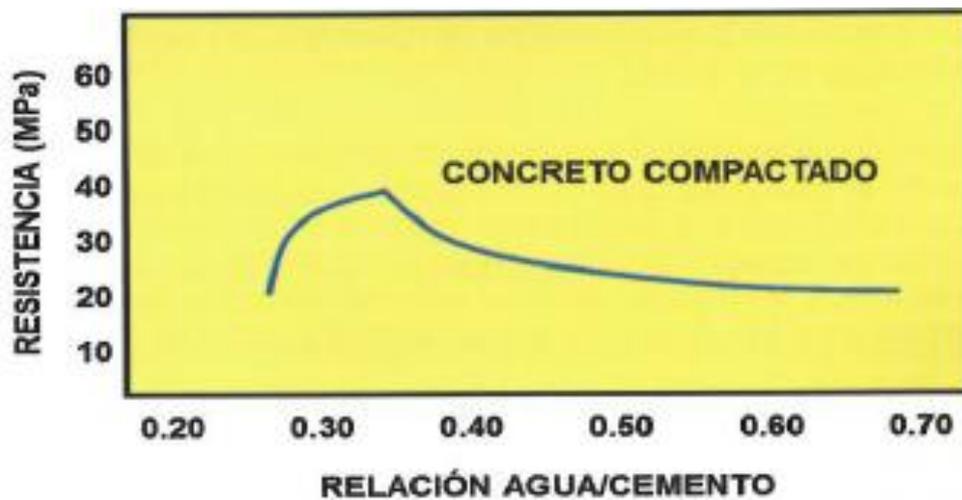
El espacio vacío (porosidad) está determinada por la relación agua/cemento. Dicha relación es de suma importancia cuando se diseña una mezcla, aunado a las consideraciones necesarias al cálculo de la absorción de los agregados: la evaporación, la temperatura ambiental y los aditivos que se tienen considerados: los reductores de agua, los retardantes, etc. (Fig. 8).

Figura 9. Diagrama esquemático de la relación de Agua/Cemento y la porosidad



Fuente: Ing. Robin y Christophe, 2014

Figura 10. Gráfica de resistencia del concreto en función de la relación Agua/Cemento



Fuente: Ing. Robin y Christophe, 2014

Una baja relación agua/cemento conduce a una alta resistencia, pero es complicado su manejo (“trabajabilidad”) de la mezcla. Una alta relación agua/cemento lleva a una baja resistencia, pero a un fácil manejo (“trabajabilidad”) de la mezcla.

El tiempo también es un factor muy importante para determinar la resistencia del concreto portland. Ya que se va endureciendo conforme pasa el tiempo. Las reacciones de hidratación disminuyen cada vez más, conforme se forma el hidrato de silicato tricálcico.

Se necesita de una gran cantidad de tiempo, incluso años, para que los enlaces se formen por completo, lo cual determina la resistencia final del concreto Portland.

2.3.2. EL CEMENTO PORTLAND ADICIONADO CON ZEOLITA SINTÉTICA

Cuando se utilizan las zeolitas sintéticas con cemento Portland, la humedad sigue siendo necesaria para la hidratación y endurecimiento.

Los cinco componentes de la composición del cemento Portland (ver tabla 30) tienen una gran influencia durante el proceso de hidratación, pero los componentes de menor importancia probablemente cambien la velocidad a la cual se producen las reacciones químicas importantes en dicho proceso. Pero al agregar las zeolitas sintéticas, la relativa distribución de componentes de hidratación cambia.

A consecuencia de esto, la cristalización del hidróxido de calcio se produce a velocidades diferentes y se consigue una reducción en la generación de calor durante las reacciones en el proceso de hidratación.

Por ello, cuando se añade las zeolitas sintéticas a la mezcla, hay más formación de cristales durante las reacciones y la matriz cristalina es más intensa y cerrada.

Al agregar las zeolitas sintéticas, la cantidad de agua atrapada como un compuesto libre cambia químicamente en esferas junto con su carga eléctrica y la tensión superficial. Reduciéndose y haciendo que los cristales crezcan en los espacios vacíos. Esto hace que el producto final sea menos permeable, por lo tanto, más resistente a todo tipo de ataques, ya sean internos o externos.

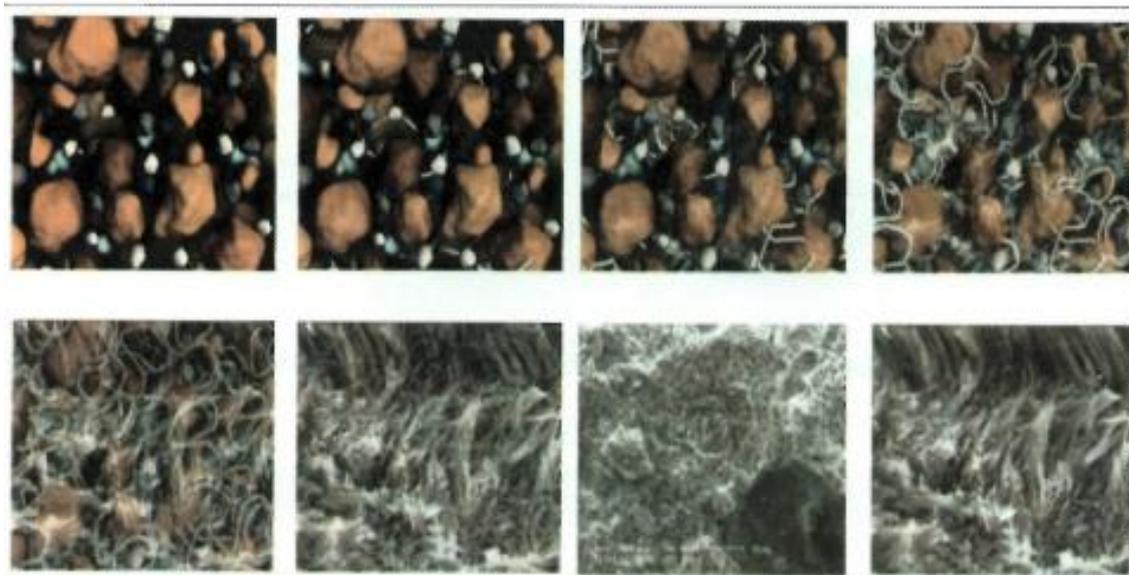
La reducción de la porosidad y el incremento de la matriz estructural cristalina, aumenta la resistencia a la compresión simple y a la tensión por flexión, por ende, el módulo elástico se ve incrementado en el nuevo suelo.

El agua sigue desempeñando un papel fundamental, sobre todo, la cantidad utilizada tanto en la etapa inicial del proceso de endurecimiento, como en el tiempo de curado. Como antes, la resistencia del suelo estabilizado con zeolita sintética y cemento aumenta si la relación agua/cemento es baja, pero no tanto como para que no se lleve a cabo bien la reacción química en el proceso de hidratación.

Al usar esta nueva nanotecnología de las zeolitas sintéticas, la reacción en el proceso de hidratación, ahora tiende a consumir una cantidad diferente de agua. Inclusive, también es posible utilizar agua salada o contaminada y lograr un buen desempeño de la estructura.

El proceso de cristalización cambia radicalmente cuando se usan zeolitas sintéticas, ya que el mecanismo de unión entre las partículas, cambia de “pegar” a “envolver” o encapsular, formando un entramado molecular de agujas largas, similar a un entrelazado de fibras (Fig.11).

Figura 11. Simulación del proceso de hidratación y el efecto de cristalización “envolvente”



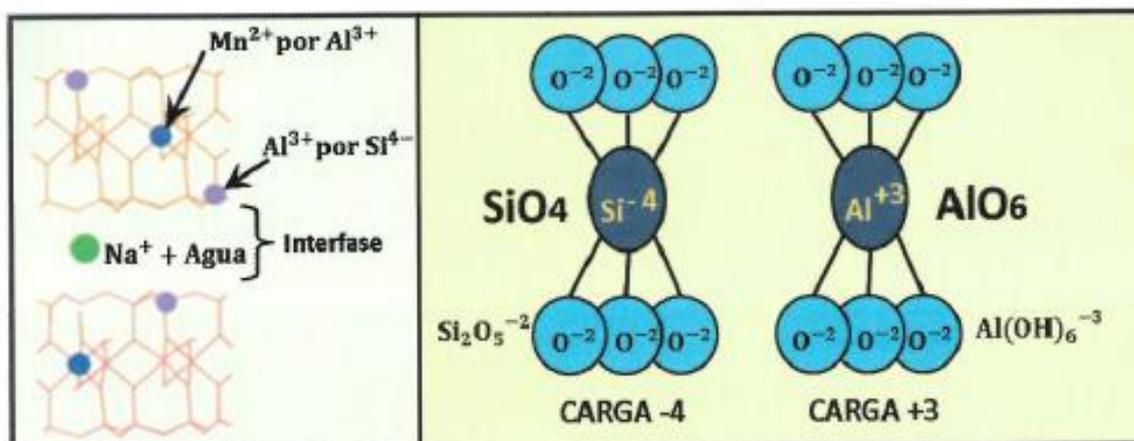
Fuente: Ing. Robin y Christophe, 2014

El efecto de “envoltura” está relacionada con la producción cristalina alargada de las reacciones químicas de hidratación, las cuales continúan con el tiempo y es esta característica tan novedosa, causada por la nanotecnología de las zeolitas sintéticas, la responsable de haber logrado modificar los enlaces del cemento portland y tener la habilidad para unir cualquier tipo de suelo, incluso las arcillas más problemáticas.

Sabemos que con agregar solo cemento Portland, esto no puede lograrse exitosamente. Lo mismo ocurrirá con la unión de otros materiales enlazables (antes del uso de esta nanotecnología) como los limos y diversos materiales contaminantes con desechos o con materia orgánica.

Además de lo anterior y debido a la composición de las zeolitas sintéticas, otros procesos químicos importantes también ocurren simultáneamente y en especial con las arcillas, como son las reacciones a través del intercambio de cationes y aniones, junto con la sustitución y neutralización de la carga (Fig. 12).

Figura 12. Sustitución y neutralización de la carga “envolvente”



Fuente: Ing. Robin y Christophe, 2014

La sustitución iónica y la modificación de carga mejoran los enlaces de las partículas cargadas e incrementan la capacidad de intercambio iónico. Este proceso se denomina electroquímico, el cual es inducido por la adición de zeolitas sintéticas y hace que sea posible unir diferentes tipos de materiales, incluso en ambientes ácidos y cuando se cambian con el “efecto envolvente”, conduce a un producto final que tiene características y desempeño muy superiores a los requisitos de los procedimientos convencionales.

2.4. PAVIMENTO FLEXIBLE

Se denomina pavimentos flexibles a aquellos cuya estructura total se deflecta o flexiona dependiendo de las cargas que transitan sobre él.

La construcción de pavimentos flexibles se realiza a base de varias capas de material. Cada una de las capas recibe cargas por encima de la capa. Cuando las supera la carga que puede sustentar traslada la carga restante a la capa inferior. De ese modo lo que se pretende es poder soportar la carga total en el conjunto de capas.

Las capas de un pavimento flexible que conforman un suelo se colocan en orden descendente en capacidad de carga. La capa superior es la que mayor capacidad de soportar cargas tiene de todas las que se disponen. Por lo tanto,

la capa que menos carga puede soportar es la que se encuentra en la base. La durabilidad de un pavimento flexible no debe ser inferior a 8 años y normalmente suele tener una vida útil de 20 años.

Las capas de un pavimento flexible suelen ser: capa superficial o capa superior que es la que se encuentran en contacto con el tráfico rodado y que normalmente ha sido elaborada con varias capas asfálticas. La capa base es la capa que está debajo de la capa superficial y está, normalmente, construida a base de agregados y puede estar estabilizada o sin estabilizar. La capa sub – base es la capa o capas que se encuentra inmediatamente debajo de la capa base. En muchas ocasiones se prescinde de esa capa sub – base.

Figura 13. Estructura de un pavimento flexible



Fuente: Ing. Robin y Christophe, 2014

2.5. BASE DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

Constituye la capa intermedia entre la capa de rodamiento y la sub-base. Generalmente, se la usa en los pavimentos flexibles. Esta capa permite reducir los espesores de carpeta, dada su función estructural importante al reducir los

esfuerzos cortantes que se transmiten hacia las capas inferiores. Además cumple una función drenante del agua atrapada dentro del cuerpo del pavimento.

Una base estabilizada consiste en una combinación del suelo con zeolita sintética y cemento Portland; en nuestro caso, su estabilidad depende de la resistencia que proporcionen estos componentes en el suelo arcilloso.

2.5.1. CARACTERÍSTICAS DE LA CAPA BASE DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

La base es la capa de material que se construye sobre la sub-base. Los materiales con los que se construye deben ser de mejor calidad que la sub-base. Las características de la base son:

- Tener la resistencia estructural para soportar las presiones transmitidas por los vehículos.
- Tener el espesor suficiente para que pueda resistir las presiones transmitidas a la sub-base.
- Aunque exista humedad, la base no debe presentar cambios volumétricos perjudiciales.

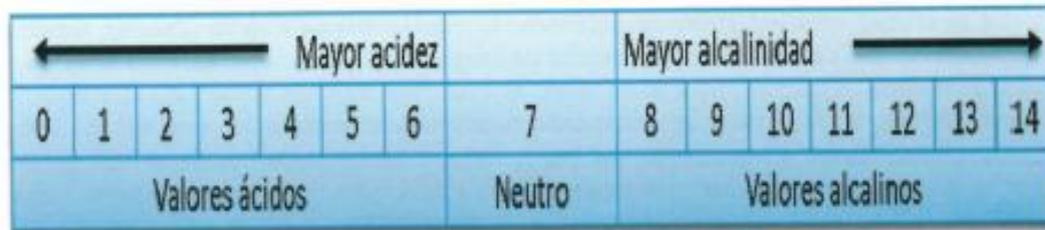
2.6. MECANISMO DE REACCIÓN DE LA ZEOLITA SINTÉTICA Y CEMENTO PORTLAND CON EL SUELO

Esta nanotecnología está constituida por zeolitas sintéticas, compuestos alcalinos y activadores de patente, que son materiales inorgánicos de carácter iónico que actúan mezclándose con el material *in situ*, cemento portland y agua, disminuyendo la sensibilidad del suelo al agua. Cuando la mezcla logra obtener el grado de humedad óptimo por adición de agua, genera los iones que neutralizan el efecto de los compuestos orgánicos (humus) y su descomposición, que evitan que el cemento reaccione y cristalice.

Los humus tienen un color rojizo y/o negro y no tienen una estructura definida. Estos generan radicales hidroxílicos (-OH alcalino) y carboxílicos (-COOH Ácidos); la cantidad de uno u otro radical determina el valor pH del suelo.

El valor del pH es una medida del grado de acidez o alcalinidad de las sustancias, el cual toma valores numéricos del 0 al 14; siendo los valores más ácidos, aquellos que son progresivamente menor que 7 y los valores más alcalinos; aquellos que son progresivamente mayores que 7 teniéndose al valor 7 como punto neutral (Fig.14).

Figura 14. Valores de pH.



Fuente: Elaboración propia

Así, por ejemplo, un mayor contenido de radicales carboxílicos (-COOH) en el suelo, significa que se tiene una mayor acidez. Estas moléculas del tipo carboxílico e hidroxílico (R-COOH y R-OH) que los compuestos orgánicos en su descomposición generan, forman una película en la superficie del cemento que inhibe su hidratación.

Las zeolitas sintéticas remueven estas moléculas a través de un proceso de intercambio iónico que neutralizan el efecto de los compuestos orgánicos. La capacidad de intercambio iónico de los humus es 2 veces mayor en un ambiente con pH 9 (alcalino) que uno con pH 5 (ácido).

Al agregar cemento Portland al suelo, el grado de alcalinidad aumenta (pH>7) señalando que la capacidad de intercambio iónico aumenta considerablemente. La fuerza intermolecular de los complejos orgánicos disminuyen también y esto origina una liberación de radicales que bloquean la superficie de las partículas del cemento Portland, por combinación con los iones de calcio (del cemento Portland) e impiden la correcta hidratación del mismo.

La germinación de los cristales de calcio es necesariamente la formación del silicato de calcio al hidratarse con el cemento. Con esta nanotecnología, se obtiene una aportación extra de iones afines a los generados por los compuestos

orgánicos; los que son secuestrados y neutralizados, no permitiéndoles el bloqueo para la reacción del cemento Portland.

De esta manera, las zeolitas sintéticas logran la estabilización y transformación esperada en suelos con baja resistencia como son los suelos arcillosos.

Todos los suelos son diferentes, por ello, es necesario conocer la calidad de estos mediante un análisis físico-químico y así determinar el procedimiento más adecuado para cada caso.

Los suelos arcillosos no se estabilizan solo con cemento. Los que son más susceptibles de lograrlo son los que contienen arena con poco contenido de arcilla y marga (sedimento arcilloso).

Otro efecto importante de esta nanotecnología es la estabilización de las partículas arcillosa por el intercambio iónico. Los iones de estas partículas se adhieren más firmemente y disminuyen así la permeabilidad al agua. Además que se eliminan las protuberancias (terrones) al mezclarse las zeolitas sintéticas con suelos arcillosos.

La propiedad más importante al obtenerse la mezcla de zeolita sintética – cemento – suelo arcilloso es que se obtiene una capacidad de carga mayor del terreno, para los fines de una construcción estable.

2.7. IMPACTO AMBIENTAL

La construcción de obras de infraestructuras de transporte, en este caso las carreteras, ocupa áreas importantes de territorio, por lo que se afecta al medio ambiente de muchas maneras. En este trabajo de investigación, se trata de aminorar este impacto ambiental ocasionado por la construcción de pavimentos, en específico el movimiento de tierras realizado en la base de un pavimento flexible.

Es común en el diseño de pavimentos flexibles; por lo tanto, en la construcción de estos se opte por una base de material de préstamo. Se le conoce material de préstamo al material proveniente de una cantera donde fue previamente seleccionado de acuerdo a los requerimientos del proyectista, esta base es en general material granular seleccionado para obtener una capacidad de carga óptima.

El impacto ambiental ocasionado por el movimiento de tierras no solo afecta al sitio de construcción, sino también al realizar la apertura y explotación de canteras o bancos de material que sirven al proyecto.

El proceso constructivo de un pavimento genera una serie de impactos ambientales, algunos de estos son:

- El incremento de las emisiones atmosféricas producto de la combustión de los tractores y camiones, también el polvo que generará el movimiento de los vehículos y el movimiento de tierra que se realizará en el área del proyecto.
- Modificación del estado físico de suelos y rocas debido al movimiento de tierras y excavaciones.

Figura 15. Modificación del estado físico de suelos



Fuente: Elaboración propia

- Transformación radical del entorno físico original y atracción escénica producto de movimiento de tierra *in situ*.

Figura 16. Modificación del entorno físico de los suelos



Fuente: Elaboración propia

- Incremento del riesgo en la salud por dispersión del polvo resultado de las condiciones de un suelo deleznable por la actividad de excavación.
- Contaminación del aire. El aire presenta contaminación cuando contiene materias o formas de energía que impliquen riesgo, daño o molestia grave a las personas, animales o plantas.
- Debido al movimiento de tierras y transporte, se produce un aumento de emisión de partículas que puede ser en parte corregido utilizando la tecnología apropiada.
- Contaminación acústica, generada por la maquinaria utilizada para las excavaciones de gran material del suelo que no se utiliza y es remplazado por material de préstamo.
- Las zonas próximas sufren una contaminación importante debido a la contaminación atmosférica por movimientos de tierras.

Las principales alteraciones geomorfológicas están provocadas por los movimientos de tierra, desmontes y terraplenes, que pueden producir en algunas zonas impactos más importantes que en otras. Las medidas preventivas corresponden al proyecto, que es donde se deben minorar las actuaciones geomorfológicas que originan la nueva carretera; esta investigación ayuda a reducir este impacto logrando modificar, transformar y reciclar el suelo arcilloso propio de la zona.

Después de la investigación, se concluye que para la construcción de una carretera, son muchos y diversos los posibles impactos ambientales que se generarán.

Los principales factores que son afectados dentro de un ecosistema por la construcción de una carretera son; por ejemplo, que el total del material utilizado en una carretera son recursos no renovables que se explotan directamente de la tierra, por lo que esta se ve afectada en su totalidad.

Al utilizar esta estabilización del suelo arcilloso con zeolita sintética y cemento, aminoramos notablemente el impacto ambiental al utilizar un material *in situ*, como es el suelo arcilloso, que es prácticamente desechado y no reciclado en la construcción tradicional de bases de estos pavimentos; provocando así también una gran cantidad de movimiento de tierras.

2.8. EXPERIENCIAS CON LA ESTABILIZACIÓN DE SUELO MÁS CEMENTO Y ZEOLITA SINTÉTICA

2.8.1. DULLES INTERNATIONAL AIRPORT -2008 – EE.UU.

En noviembre de 2008, se inauguró la cuarta pista de aterrizaje del Aeropuerto Internacional de Dulles, Washington, EE.UU.

Figura 17. Aeropuerto de Dulles EE.UU



Fuente: Ing. Pablo del Aguila CAMINEROS CONSULTING

Con un costo de US \$ 356 millones, la construcción de la pista incluyó el tratamiento previo de los suelos con un 5% de cemento.

En el año 2010, CAMINEROS desarrolló un estudio para una vía cuyo tráfico estaba conformado mayoritariamente por camiones de carga; siendo el valor del tráfico de diseño de 90x106 ejes equivalentes y el CBR del suelo, 10%.

Para la ampliación y mejoramiento de la vía, se planteó una alternativa para la rehabilitación del pavimento existente mediante el reciclado *in situ* de la capa asfáltica y capas granulares.

Figura 18. Aeropuerto Internacional de Dulles EE.UU



Fuente: Ing. Pablo del Aguila CAMINEROS CONSULTING

Después de la investigación concluimos que para la construcción de una carretera, son muchos y diversos posibles impactos ambientales que se generarán.

Debido al alto nivel de tráfico y por la importancia de la vía, se planteó la necesidad de diseñar un pavimento de alta performance; considerando la filosofía de un PAVIMENTO PERPETUO.

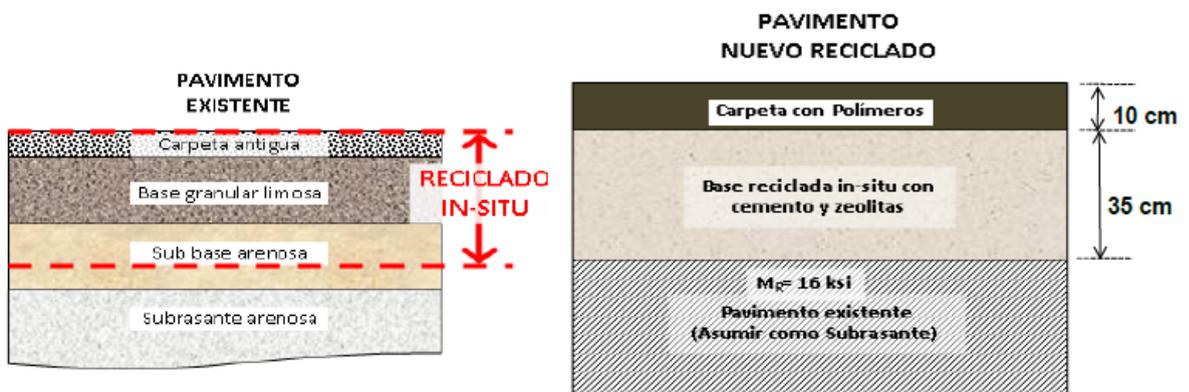
Para tal fin se consideró una estructura conformada por una capa granular de 35 cm de espesor, reciclada con cemento de alta resistencia; considerando el empleo de un aditivo en base a ZEOLITAS SINTÉTICAS y una capa de rodadura de 10 cm de espesor, con asfalto modificado con polímeros tipo SBS.

Debajo de la capa reciclada quedaría un remanente de las capas granulares existentes.

No se consideró disturbar el suelo de fundación. Tampoco se consideró emplear materiales transportados de cantera, ni mejorar las características granulométricas de los materiales existentes.

Los principales factores que son afectados dentro de un ecosistema por la construcción de una carretera son, por ejemplo, que el total del material utilizado en una carretera son recursos no renovables que se explotan directamente de la tierra, por lo que esta se ve dañada en su totalidad.

Figura 19. Diseño del Pavimento estabilizado con concreto zeolítico



Fuente: Ing. Pablo del Águila CAMINEROS CONSULTING

ENSAYOS DE LABORATORIO

Se efectuaron ensayos de laboratorio con muestras obtenidas en campo, las que también fueron practicadas en los EE. UU. en el laboratorio PRI Construcción Inc., Tampa, Florida.

Figura 20. Resultados de laboratorio del pavimento estabilizado con concreto zeolítico

Resultados Generales							
Muestra	Resistencia a la Compresión		Módulo de Elasticidad Estático			Módulo Resiliente (Dinamico)	
	ksi	Mpa	ksi	Mpa	Poisson Ratio	ksi	Mpa
1	1.43	9.85	-	-	-	-	-
2	1.91	13.16	1,514	10,436	0.24	-	-
3	1.56	10.74	1,128	7,779	0.28	-	-
4	-	-	-	-	-	1,927	13,296
5	-	-	-	-	-	3,302	22,765
6	-	-	-	-	-	2,661	18,347
7	2.02	13.93	1,473	10,157	0.15	-	-

Fuente: Ing. Pablo del Águila CAMINEROS CONSULTING

2.8.2. VERACRUZ, COATZACOALCOS – VIALIDADES INTERNAS EN EL COMPLEJO PETROQUÍMICO ETILENO XXI – MÉXICO

La presente obra se encuentra ubicada al sur de la República Mexicana, municipio de Nanchital; cerca de la Ciudad Industrial de Coatzacoalcos Estado de Veracruz y consistió en la construcción de un complejo petroquímico denominado “Etileno XXI”; integrado por una unidad fraccionadora de etileno con capacidad de 1 050 toneladas por año y dos plantas de polietileno de alta densidad propiedad de la empresa Braskem Idesa, la cual es la mayor empresa a nivel mundial en su sector. El diseño y construcción de este complejo estuvo a cargo de las empresas Odebrecht, Technip e ICA Flúor, por lo que esta última subcontrató a PowerCem México para la estabilización y construcción de 74 430.40 m² de vialidades internas y 9 000 m² de plataformas provisionales, debido a las ventajas que el sistema constructivo que un concreto zeolítico ofrece frente a los sistemas de construcción tradicionales en cuanto a reducción de costos y tiempos de construcción.

Figura 21. Escarificado del terreno



Fuente: PowerCem Technologies B.V.

Figura 22. Esparcido de zeolita sintética en el suelo



Fuente: PowerCem Technologies B.V.

Figura 23. Esparcido del cemento en el suelo



Fuente: PowerCem Technologies B.V.

Figura 24. Mezclado del suelo estabilizado con zeolita sintética y cemento



Fuente: PowerCem Technologies B.V.)

Figura 25. Curado del suelo estabilizado con zeolita sintética y cemento



Fuente: PowerCem Technologies B.V.

2.8.3. PROYECTO REHABILITACIÓN DE LA AUTOPISTA NÉSTOR GAMBETTA CALLAO – PERÚ

Este proyecto consistió en la construcción de tramos de pruebas con una estabilización de pavimento reciclado con suelo, cemento y zeolita sintética.

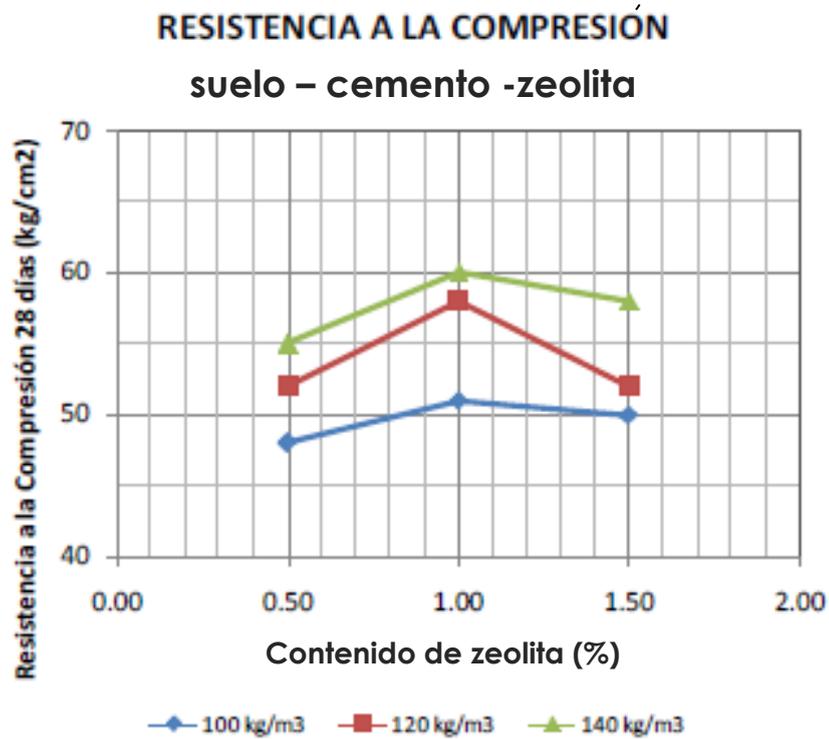
Diseño del Pavimento

C.A.c/Polímeros	e=12 cm
Base reciclada	e=30 cm
Subbase actual	e = 15 cm
Subrasante	CBR=10%

Dosificación del cemento y zeolitas

De acuerdo a los ensayos de laboratorio efectuados con materiales del proyecto de la Av. Néstor Gambetta, considerando diversas dosificaciones de cemento y zeolitas, se encontró que con un contenido de 140 kg/m³ de cemento es posible obtener una resistencia a la compresión simple de $f'c=60$ kg/cm² a los 28 días.

Figura 26. Resistencia a la compresión de suelo – cemento – zeolita sintética, Autopista Gmabetta



Fuente: PowerCem Technologies B.V.

APLICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

Se construyó un tramo experimental considerando la dosificación obtenida en el laboratorio.

Dosificación de cemento portland tipo I: 140 kg/m³

Dosificación de aditivo zeolítico: 1.4 kg/m³

Dosificación de agua: OCH=6% (+2%).

Se estableció el procedimiento constructivo a seguir

Figura 27. Nivelación y compactación del material tratado con zeolita



Fuente: Ing. Pablo del Águila CAMINEROS CONSULTING

Figura 28. Aplicación de cemento, mezclado nivelación y compactación



Fuente: Ing. Pablo del Águila CAMINEROS CONSULTING

Figura 29. Aplicación de la imprimación a los 2 días



Fuente: Ing. Pablo del Águila CAMINEROS CONSULTING

Figura 30. Monitoreo del pavimento estabilizado con concreto zeolítico



Fuente: Ing. Pablo del Águila CAMINEROS CONSULTING

CAPÍTULO III

ENSAYOS REALIZADOS AL MATERIAL ARCILLOSO

Los ensayos de laboratorio son utilizados para caracterizar las muestras de suelo extraídas anteriormente y estimar su comportamiento bajo ciertas condiciones. Dichos resultados fueron cuantificados en propiedades físicas que deben ser obtenidas mediante procedimientos estándar. Para nuestro caso, se seleccionaron los procedimientos estándar de las ASTM como guías principales.

3.1. EXTRACCIÓN DEL MATERIAL

Esta investigación está basada en el suelo arcilloso. Para la obtención de este tipo de suelo, nos basamos en estudios ya realizados donde alegan que este tipo de suelos, según la geotecnia de Arequipa, se encuentran en Chivay,

provincia de Arequipa. Para esta investigación, utilizamos el suelo de esta provincia por ser más accesible al lugar donde estamos realizando los ensayos.

3.1.1. PROCEDIMIENTO DE MUESTREO

El muestreo consistió en la extracción del suelo como se aprecia en la figura 31 El material extraído se colocó en bolsas de 30 kilos. Posteriormente, el material se trasladó al laboratorio para ser analizado y realizar pruebas.

Figura 31. Extracción del suelo arcilloso en el lugar donde se realizó el muestreo



Fuente: Elaboración propia

3.2. PROPIEDADES FÍSICAS Y MECÁNICAS

3.2.1. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD

Ensayo que permite determinar el contenido de agua que tiene una cantidad de suelo en términos de peso en seco. El suelo es una composición de tres fases: sólida, líquida y gaseosa (aire). La fase líquida o agua presente en los poros posee un marcado efecto en el comportamiento del suelo. El

procedimiento de este ensayo corresponde a la norma ASTM 2216. El contenido de la humedad natural permite definir a priori el tratamiento a dar al suelo, además de estimar su posible comportamiento como subrasante.

Si el contenido de humedad es cercano al límite líquido, es probable tratar con un suelo muy sensitivo y, por el contrario, si el contenido de humedad es cercano al límite plástico, puede anticiparse que el suelo tendrá un buen comportamiento.

El contenido de humedad de una masa de suelo está formado por la suma de sus aguas libres, capilares e higroscópicas.

El método tradicional de determinación de la humedad del suelo en laboratorio es por medio de secado a honro, donde la humedad de un suelo es la relación expresada en porcentaje entre el peso del agua existente en una determinada masa de suelo y el peso de las partículas sólidas, es decir:

$$W\% = (Ww/ Ws) * 100 (\%)$$

Donde:

W = contenido de humedad expresado en %

Ww = peso del agua existente en la masa de suelo

Ws = peso de las partículas sólidas

Figura 32. Hallando el contenido de humedad natural del material



Fuente: Elaboración propia

Tabla 2. Determinación del contenido de humedad natural

DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO DE HUMEDAD			
	M1	M2	M3
Peso suelo húmedo	674.00	585.90	671.50
Peso de suelo seco	603.10	524.10	600.90
Peso de agua	70.90	61.80	70.60
Conten. De humedad (%)	11.76	11.79	11.75
Conten. De humedad (%)	11.77		

Fuente: Elaboración propia

3.2.2. CLASIFICACIÓN E IDENTIFICACIÓN DEL TIPO DE SUELO (SISTEMA SUCS)

Se realiza mediante ensayos de granulometría y ensayos de límites de Atterberg. Con los datos obtenidos y mediante tablas de clasificación se determina la clase o tipo de suelo.

3.2.2.1. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO

Es el proceso por el cual se cuantifica las partículas o granos de material de distintos diámetros mediante los pesos en una serie de tamices dispuestos por niveles de forma descendente (de mayor a menor diámetro), cuyos diámetros son ya establecidos. Los procedimientos para este análisis fueron tomando en cuenta la norma ASTM C 136, “*Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Course Aggregates*”.

La finalidad de esta prueba fue obtener la cantidad de suelo fino que contiene el suelo pasándolo por la malla 200.

En nuestro caso, primero se procedió al disgregado del material con un mazo de madera sin alterar el tamaño de las partículas; después de mezclar todo el material para tener una homogenización total. Luego cuarteamos el material para obtener una muestra representativa, la cual será pasada por las mallas de diferentes aberturas. Los procedimientos de ensayo para el suelo se encuentran en los anexos de este trabajo.

Figura 33. Muestra de suelo después del cuarteo para pasar por tamices



Fuente: Elaboración propia

Figura 34. Lavado de muestra por el tamiz #200



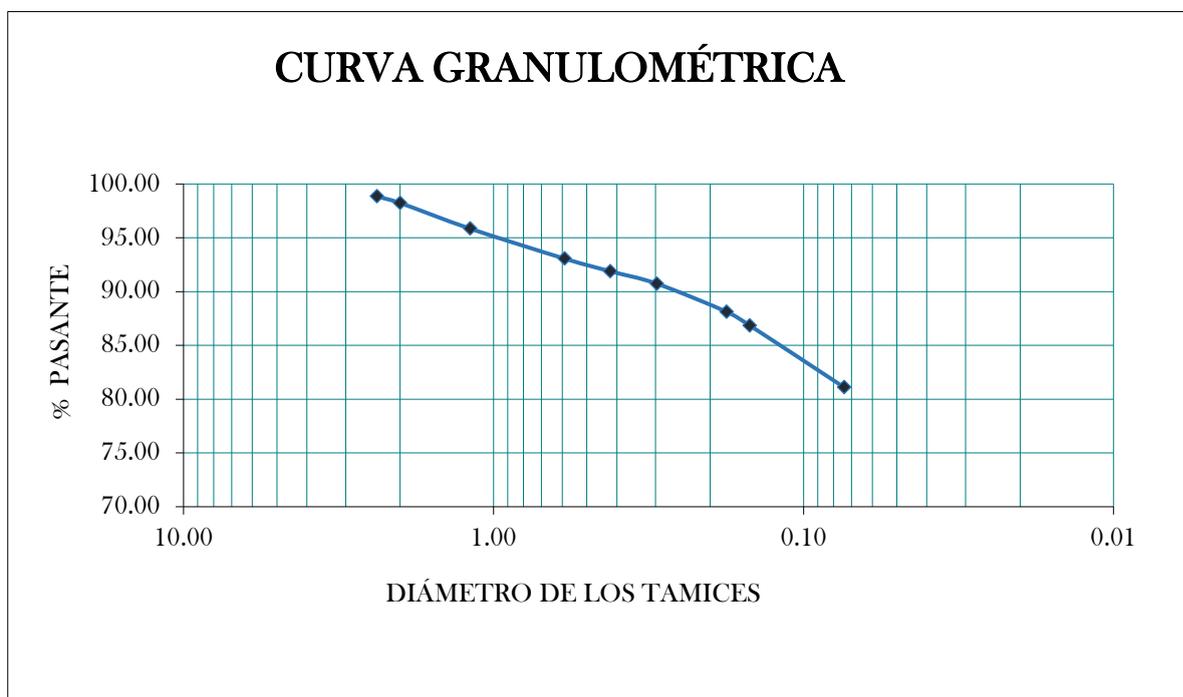
Fuente: Elaboración propia

Figura 35. Tamices a utilizar para la granulometría



Fuente: Elaboración propia

Figura 36. Análisis granulométrico del suelo



Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2. LÍMITES DE ATTERBERG

La plasticidad de los materiales es muy importante porque podemos obtener la capacidad que tiene este material a deformarse y remodelarse sin sufrir agrietamientos; es decir, podemos saber la cualidad del material para soportar deformaciones rápidas sin deformarse ni agrietarse.

Primero se realizaron estos ensayos al material sin estabilizadores, al suelo arcilloso propiamente dicho.

3.2.2.2.1. Límite líquido

Es el mayor contenido de humedad que puede tener el suelo sin pasar del estado plástico a líquido. Esta se define como la condición en la que la resistencia al corte del suelo es tan baja que un ligero esfuerzo lo hace fluir.

Para el límite líquido (LL), se usa la cuchara de Casagrande en la cual se unta material pasante de la malla nro. 40, formando una franja con el ranurador y dando golpes secuenciales con la manija de la cuchara hasta que ambos extremos se junten a una longitud de 1.27 cm (1/2 pulgada). Los golpes varían de 15 a 35 (ASTM D4318), tomando las humedades y número de golpes para cada prueba (Ver Fig. 37).

Figura 37. Cuchara Casagrande



Fuente: Elaboración propia

3.2.2.2. Límite plástico

El límite plástico se define como la mínima cantidad de humedad con la cual el suelo se vuelve a la condición de plasticidad. En este caso, el suelo puede ser deformado rápidamente o moldeado sin recuperación elástica, cambio de volumen, agrietamiento o deformación.

El límite plástico (LP) se obtiene mediante la fabricación de rollitos a un diámetro de 3.18 mm al momento de la falla o rajadura de todo su perímetro, tomando la humedad de una cantidad mayor o igual a 10 gr de los rollos para 2 capsulas respectivamente (ASTM D4318) (Ver Fig. 38).

Figura 38. Limite plástico



Fuente: Elaboración propia

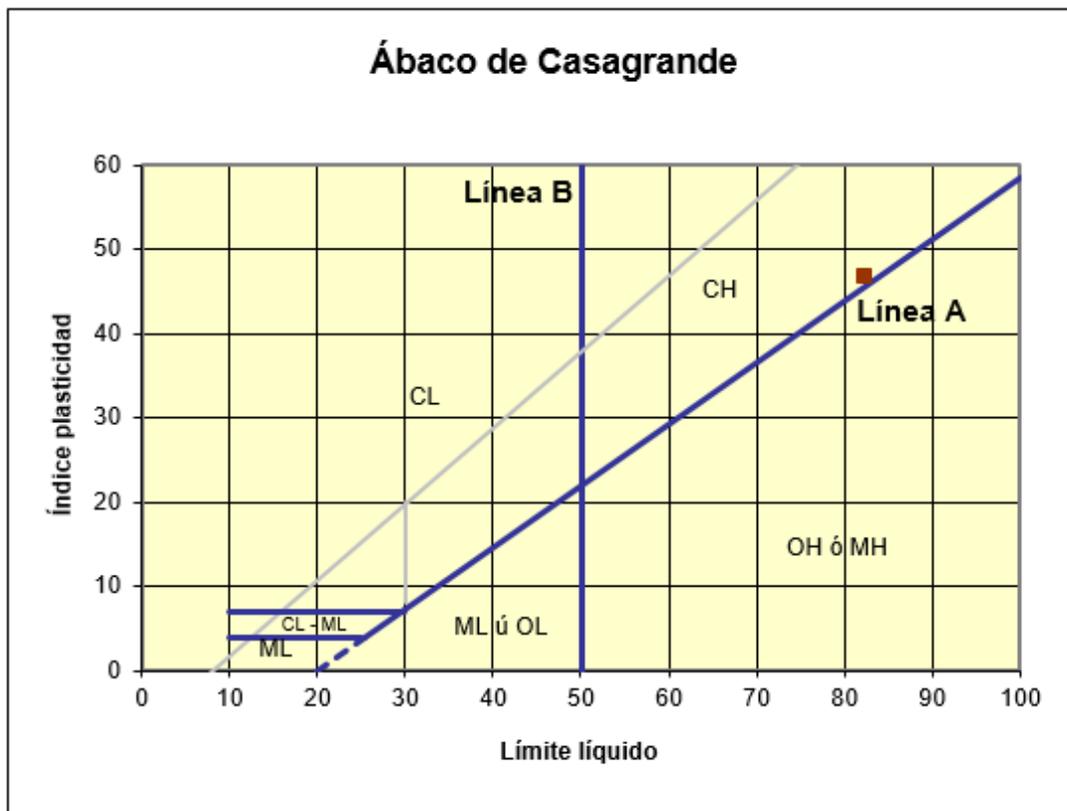
LÍMITE LÍQUIDO: 82.41 %

LÍMITE PLÁSTICO: 35.76 %

ÍNDICE DE PLASTICIDAD: 46.65 %

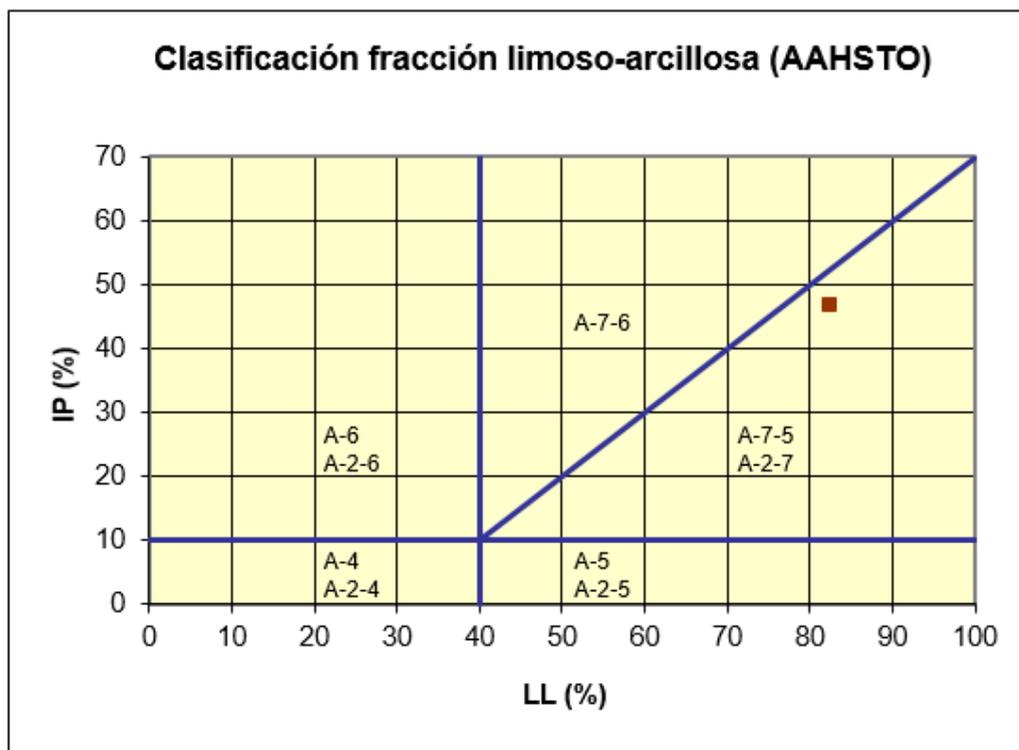
La representación de estos resultados sobre la carta de plasticidad de Casagrande proporciona una clasificación de la muestra como una arcilla de alta plasticidad, **CH**.

Figura 39. Clasificación en el ábaco de Casagrande



Fuente: Elaboración propia

Figura 40. Clasificación según AASHTO



Fuente: Elaboración propia

La representación de estos resultados sobre las tablas de clasificación de AASHTO proporciona una clasificación de un suelo arcilloso, **A-7-5**

3.2.3. DENSIDAD RELATIVA DE LAS PARTÍCULAS DEL SUELO

La densidad de los sólidos se define como la relación que existe entre el peso de los sólidos y el peso del volumen del agua desalojados por los mismos.

Generalmente; la variación de la densidad de los sólidos es de 2.60 a 2.80; aunque existen excepciones como en el caso de la turba en la que se ha registrado valores de 1.5 y aún menores, debido a la presencia de materia orgánica. En cambio en suelos con cierta cantidad de minerales de hierro, la densidad de los sólidos ha llegado a 3.

El peso específico relativo de los sólidos es una propiedad índice que debe determinarse a todos los suelos, debido a que este valor interviene en la mayor parte de los cálculos relacionados con la mecánica de suelos, en forma relativa, con los diversos valores determinados en el laboratorio pueden clasificarse algunos materiales. Una de las aplicaciones más comunes de la densidad es la obtención del volumen de sólidos, cuando se calcula las relaciones gravimétricas y volumétricas de los suelos (Ver fig. 41).

El procedimiento para este ensayo, se realizó según los lineamientos de la norma ASTM C 128, "*Estándar Test Method for density, Relative Density*", de las que se ha deducido un valor de densidad relativa de las partículas sólidas de **2.78 g/cm³**.

Figura 41. Elaboración y proceso de prueba de la densidad de sólidos



Fuente: Elaboración propia

3.2.4. COMPACTACIÓN

3.2.4.1. PRUEBA DEL PROCTOR MODIFICADO

El ensayo consistió en preparar mínimo 5 muestras del suelo, variando el contenido de agua hasta obtener la densidad máxima seca (Dry Density) mediante un compactador de 10 lbf (44.5 N) en un molde de dimensiones según el tamaño de las partículas del suelo del método de ensayo (Proctor Modificado Método A), dispuesto en 5 capas a 25 golpes cada una para asegurar una energía de compactación modificada de 56 250 ft – lbf/ft³.

El procedimiento antes mencionado genera una relación de al menos 6 datos que, siendo graficados y correlacionados, permite observar una curva cóncava hacia abajo con un punto máximo definiendo como (COH, γ máx.).

Con este procedimiento de compactación, el proctor obtiene el contenido de humedad o COH es determinado por la relación humedad – densidad a través del ensayo de Proctor Modificado ASTM D1557, encontrando que tal valor es de

vital importancia en la compactación lograda. En efecto observo que a contenidos de humedad crecientes, a partir de valores bajos, se obtienen más altos pesos específicos secos y, por tanto, mejores compactaciones del suelo. Pero que esta tendencia no se mantienen indefinidamente, sino que al pasar la humedad de un cierto valor, los pesos específicos secos obtenidos disminuían, resultando peores compactaciones.

El Proctor puso de manifiesto que, para un suelo dado y usando el procedimiento descrito, existe una humedad inicial llamada “óptima”, que produce el máximo peso específico seco que puede lograrse con este procedimiento de compactación (Ver Fig. 42).

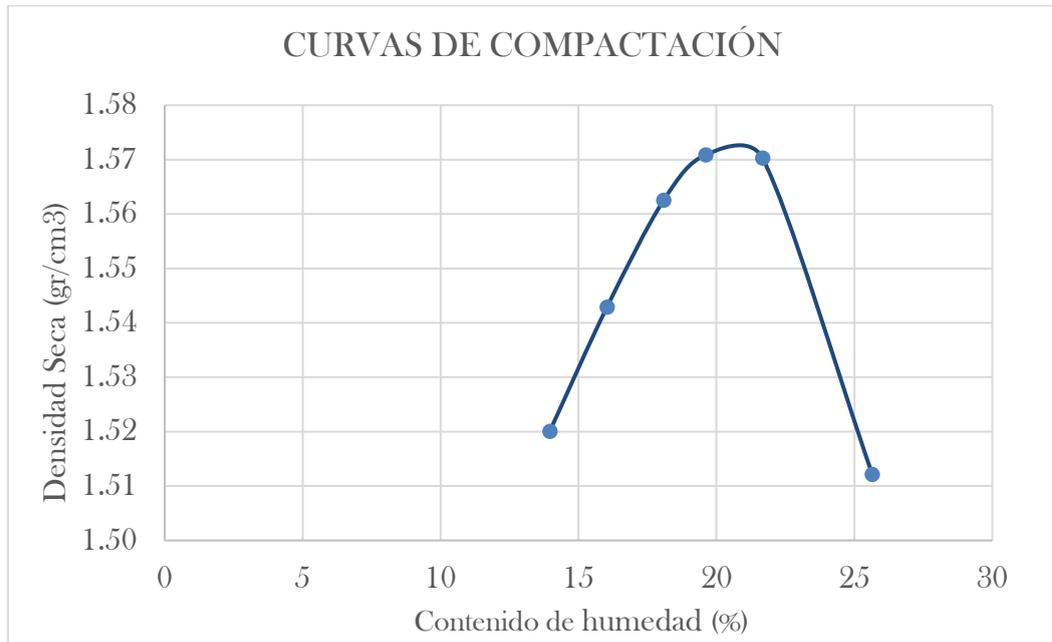
De los ensayos se obtuvo una densidad máxima γ Max promedio de **1.57 gr/cm³** y un COH (Contenido de Humedad Óptimo) promedio de **21 %**

Figura 42. Ensayo de Proctor Modificado Método A



Fuente: Elaboración propia

Figura 43. Curva de relación humedad – densidad



Fuente: Elaboración propia

3.2.5. ENSAYO DE CBR (California Bering Ratio – ASTM D 1883)

El índice de California (CBR) es una medida de la resistencia al esfuerzo cortante de un suelo, bajo condiciones de densidades y humedad cuidadosamente controladas. Se usa en el diseño de pavimentos flexibles.

Figura 44. Elaboración de moldes para CBR



Fuente: Elaboración propia

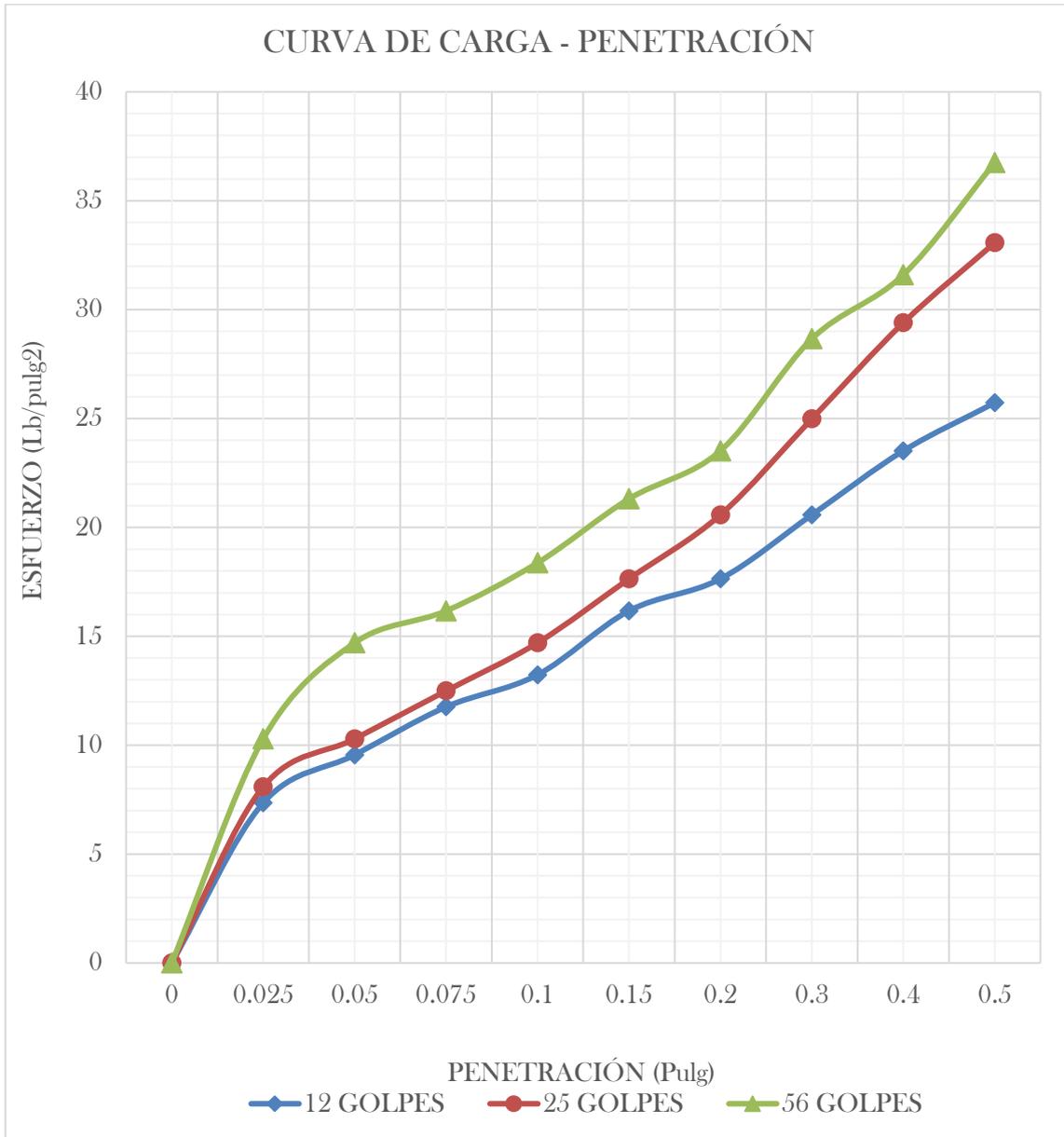
El CBR se expresa en porcentaje como la razón de carga unitaria que se requiere para introducir un pistón dentro del suelo, a la carga unitaria que se requiere para introducir el mismo pistón a la misma profundidad en una muestra tipo de piedra triturada (carga patrón).

Figura 45. Medición de la expansión y penetración para hallar CBR



Fuente: Elaboración propia

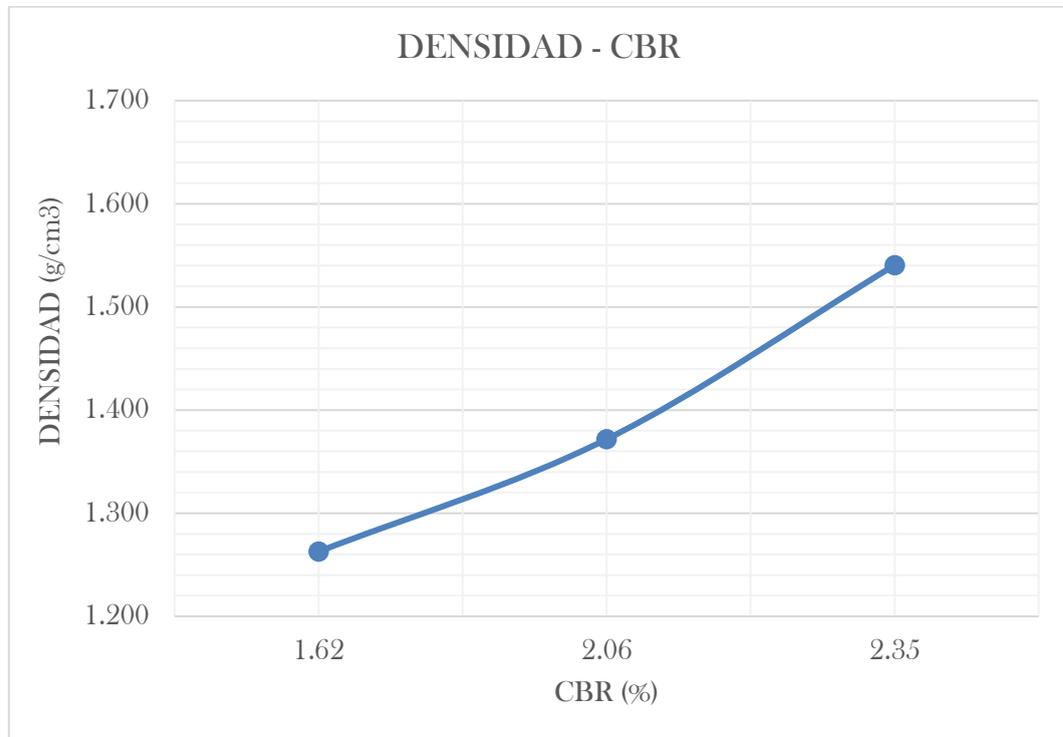
Figura 46. Relación esfuerzo – deformación del suelo



Fuente: Elaboración propia

CBR al 100% de máxima densidad =	2.35%
CBR al 95% de máxima densidad =	2.20%

Figura 47. Relación densidad – CBR % del suelo



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO IV

DISEÑO DEL SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON ZEOLITA SINTÉTICA Y CEMENTO

4.1. GENERALIDADES Y COMPONENTES DEL DISEÑO DE SUELO ESTABILIZADO

4.1.1. MATERIALES CEMENTANTES

Una vez halladas las propiedades físicas, químicas y mecánicas, se procedió a la selección del material cementante que fue utilizado en el ensayo del Proctor Modificado junto con el suelo arcilloso para determinar el contenido de agua óptimo de la mezcla, el mismo que fue utilizado en la dosificación del

suelo estabilizado cumpliendo los requerimientos de CBR y resistencia para base de un pavimento flexible.

El material cementante utilizado para estos ensayos para la estabilización de un suelo arcilloso, es el Cemento Portland IP marca YURA para el diseño de mezclas del suelo – zeolita sintética – cemento, debido al contenido de puzolana que le ayuda a ganar resistencia a lo largo del tiempo.

Tabla 3. Propiedades físicas del cemento Portland Puzolánico tipo IP de Cemento Yura

REQUISITOS FÍSICOS	PORTLAND PUZOLÁNICO YURA		NORMA NTP 334.090 ASTM C595	
Peso específico (gr/cm ³)	2.85			
Expansión en autoclave (%)	0		0.80 Máx	
Fraguado Vicat inicial (minutos)	170		45 Min	
Fraguado Vicat final (minutos)	270		420 Máx	
Resistencia a la compresión	kgf/cm ²	Mpa	kgf/cm ²	Mpa
1 día	104	10	-	-
3 días	199	20	133 Min	13
7 días	247	24	2014Min	20
28 días	342	34	255 Min	25
60 días	397	39	-	-
Resistencia a los sulfatos	CEMENTO IP			
% Expansión a los 14 días	0.018		-	

Fuente: Versión noviembre 2014

4.1.1.1. DOSIFICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND IP

En el laboratorio, suele tenerse el problema en las primeras dosificaciones para la preparación de los especímenes de las diferentes pruebas. La siguiente tabla proporciona una guía para la elección de esos primeros porcentajes.

Tabla 4. Porcentajes de cemento para especímenes en pruebas de durabilidad

SUELO	Porcentaje de cemento, en peso, usualmente requerido por la capa terminada	Porcentaje de cemento en peso, a usar inicialmente en pruebas de compactación	Porcentaje de cemento, en peso, a usar inicialmente en pruebas de durabilidad
GW, GP, GM y SW	3 a 8	5 a 6	3 a 7
SC, GC	5 a 9	7	5 a 9
SP, SM	7 a 11	9	7 a 11
ML	7 a 12	10	8 a 12
CL, OL, MH	8 a 13	10	8 a 12
CH	9 a 15	12	10 a 14
OH, P	10 a 16	13	11 a 15

Fuente: Rico Rodríguez y Hermilio del Castillo, 1977

Ya habiendo realizado los ensayos necesarios para la clasificación del suelo, sabemos que se trata de un suelo arcilloso, CH. Por lo tanto, según la recomendación de Rico Rodríguez tendríamos que utilizar un porcentaje de 9 al 15 %.

En este trabajo realizaremos una comparación del contenido de cemento que deberíamos utilizar para estabilizar el suelo arcilloso, contra el contenido de cemento que vamos a utilizar con la adición de otro estabilizador previo, siendo este la zeolita sintética; con estos resultados queremos demostrar la mayor eficiencia tanto en resistencia, durabilidad como en economía, que nos facilita la estabilización con este método a nivel nanotecnológico.

Para la realización de ensayos comparativos, empezamos con una dosificación de 10% de cemento en peso para el suelo arcilloso; seguidamente, trabajamos con una dosificación de un 12 % y 14 % de cemento en peso y

realizamos los ensayos necesarios para obtener la resistencia a la compresión simple del suelo estabilizado y así poder hallar una dosificación adecuada.

Los parámetros que debemos tener en cuenta en la dosificación es la utilización que le vamos a dar al suelo que se desea utilizar como base de un pavimento flexible para lo que es necesario que cumpla con los siguientes valores de compresión simple (tabla 5). Tras 7 días de curado a humedad constante. La resistencia de especímenes análogos sumergidos en agua no debe ser más de un 20 % menor.

Tabla 5. Propiedades comúnmente exigidas a las mezclas de suelo – cemento

TIPO DE CAPA	RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE	EXPANSIÓN
	kg/cm ²	%
Sub-bases, material de relleno para trincheras	3.5 - 10.5	2
Sub-bases o bases para tránsito muy ligero (4)	7.0 - 14.0	2
Bases para tráfico intenso	14.0 - 56.0	2
Protecciones de terraplenes contra erosión y acción de agua	>56	2

Fuente: Rico Rodriguez y Hermilio del Castillo, 1977

4.1.2. ZEOLITA SINTÉTICA

La dosificación de zeolita sintética debe ser con respecto a la masa volumétrica seca máxima de la curva de compactación del suelo natural. El grado de compactación de las muestras cilíndricas, deben ser con respecto al ensayo

de Proctor Modificado realizado y las curvas de compactación que en este ensayo fueron halladas.

Se debe contar con el valor de la humedad natural del suelo para poder determinar su masa seca, ya que la cantidad de zeolitas sintéticas y cemento Portland IP se calculan con respecto a la masa seca del suelo natural.

La dosificación de zeolita sintética se realiza en relación con el cemento portland adicionado al suelo, esta relación es del 1% de la cantidad de cemento que corresponde al suelo. Esta dosificación del 1% se toma como referencia de ensayos ya realizados en el Manual de la Nanotecnología en Pavimentos del Concreto Zeolítico Sintético (Robin y Christophe 2014).

4.1.3. AGUA

La calidad del agua para la estabilización de suelos está gobernada por los mismos requerimientos que para el concreto convencional. El agua será limpia, clara y libre de ácidos, sales, álcalis o materiales orgánicos que puedan ser perjudiciales a la calidad del suelo estabilizado.

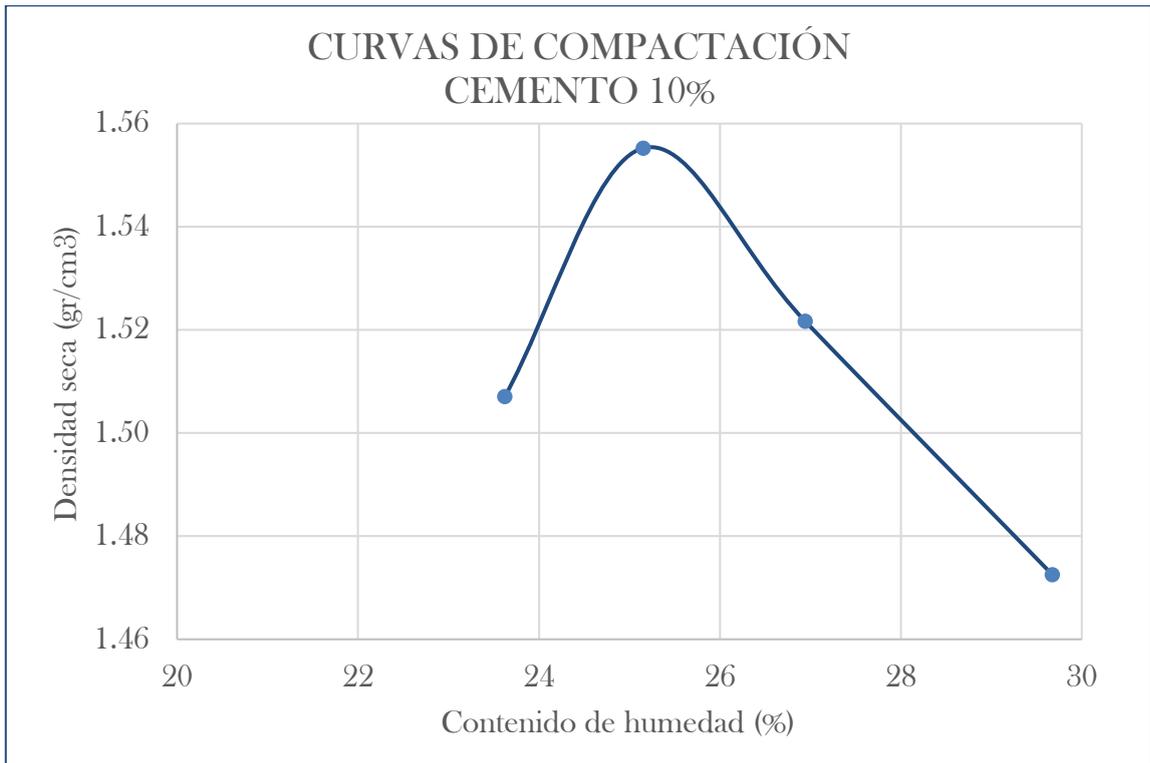
4.2. MÉTODO DE DISEÑO DE UN SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON CEMENTO

4.2.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD

Para la estabilización del suelo arcilloso con cemento, tomamos como referencia las proporciones que especifican en el libro de Mecánica de Suelos de Juárez Badillo – Rico Rodríguez y también las dosificaciones recomendadas por Federal Highway Administration (FHWA) en el que según la clasificación del suelo nos dan un rango de porcentajes de cemento los cuales son verificados con los resultados de laboratorio.

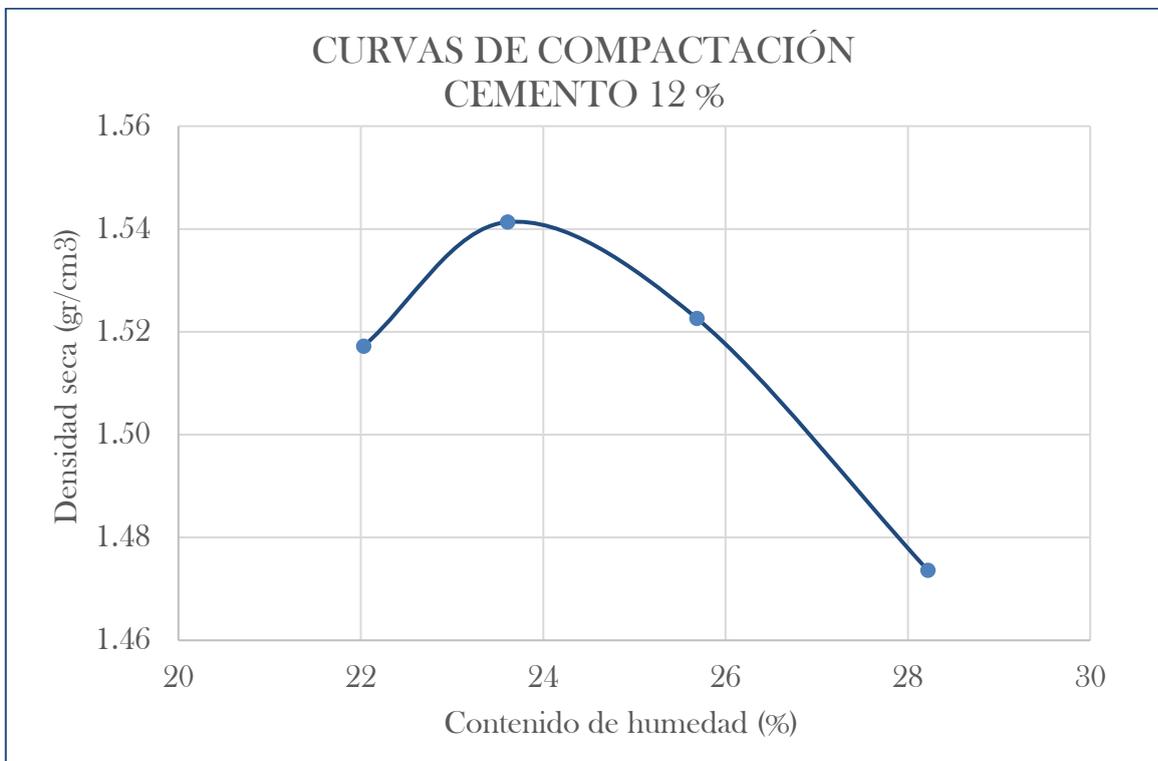
Nuestro suelo es un CH, A-7-5, suelo arcilloso con plasticidad alta; por lo que su porcentaje de cemento a utilizar según la siguiente tabla sería del 9% al 15%.

Figura 48. Curva de relación humedad – densidad al 10% de cemento



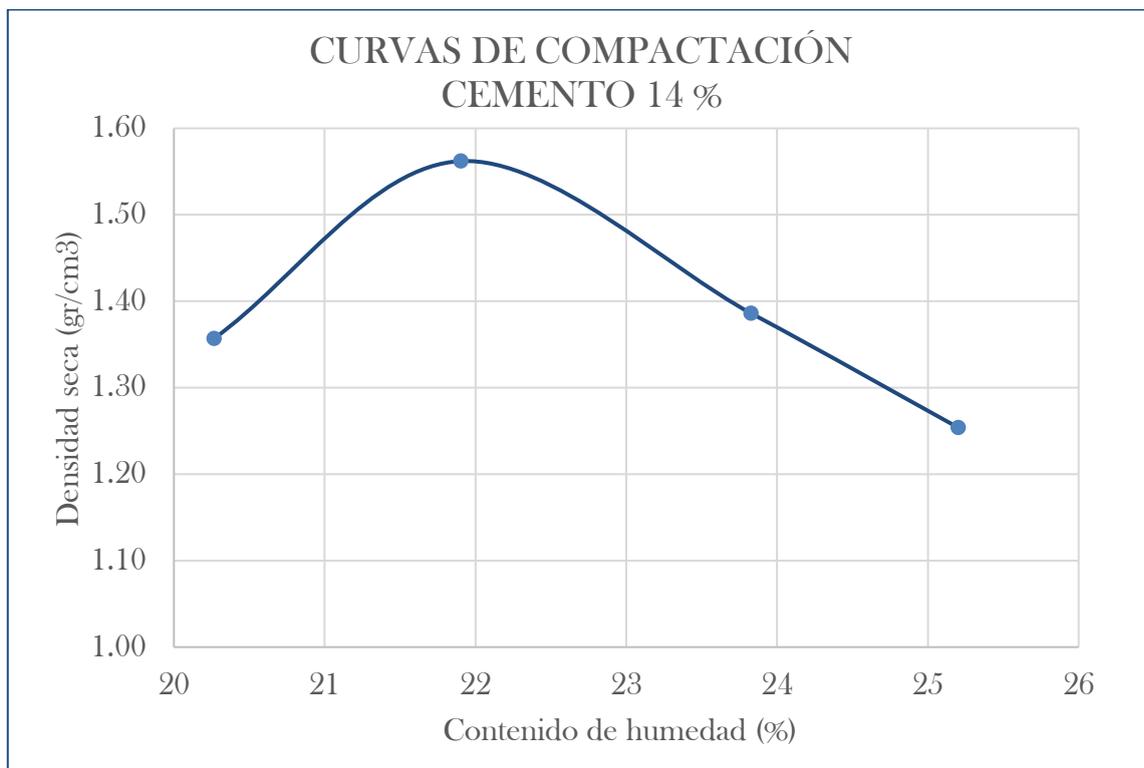
Fuente: Elaboración propia

Figura 49. Curva de relación humedad – densidad al 12% de cemento



Fuente: Elaboración propia

Figura 50. Curva de relación humedad – densidad al 14% de cemento



Fuente: Elaboración propia

Tabla 6. Densidad máxima seca y humedad óptima para cada porcentaje de cemento en peso

CONTENIDO DE CEMENTO	10%	12%	14%
DENSIDAD MÁXIMA - MDS (gr/cm³)	1.55	1.54	1.56
HUMEDAD ÓPTIMA - OCH (%)	25.20	23.61	21.93

Fuente: Elaboración propia

4.2.1.1. PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA PARA VARIAS PROPORCIONES DE CEMENTO

Luego de haber calculado el óptimo contenido de agua, se determina la proporción de todos los componentes, la dosificación más conveniente en peso; debido al tratado del material como suelo mejorado.

Tabla 7. Peso del cemento por m3 obtenido por varios investigadores

INVESTIGADORES	Cemento en kg/m ³
[Meddah A., Beddar M. & Bali., (2014)]	295
[Vahedifard F., Nili M., Meehan C.L., (2010)]	238 y 281
[Nili M., Zaheri M., (2010)]	250 y 300
[Madhkhan M., Azizkhani R., M.E. Toriki Harchegani, (2010)]	274
[Courard L., Michel F.; Delhez P., (2009)]	250
[Villena J., Triches G., L, R. Prudencio Jr, (2011)]	120

Fuente: Elaboración propia

Para la dosificación de las mezclas, seguiremos el siguiente procedimiento:

$$P = P_w + P_s + P_c$$

Donde:

P_w = Peso del agua

P_s = Peso del suelo

P_c = Peso del material cementante

El contenido de humedad basado en el total de masa de sólidos, está dada por:

$$W = \frac{P_w}{P_s + P_c}$$

Por otro lado, el peso del material cementante P_c está establecido para la dosificación como porcentaje de la masa seca del suelo:

$$P_c = \frac{n}{100} * P_s$$

La variable n es el porcentaje de la masa seca del agregado, resolviendo las ecuaciones mencionadas se obtiene la proporción de cada componente existente en el volumen V del molde. Se desarrolló la dosificación en peso para las cantidades de cemento de 10%, 12% y 14%.

Sabiendo el contenido óptimo de humedad del peso total de agregado para cada una de las dosificaciones de cemento, se muestra como ejemplo la dosificación para la elaboración de un testigo que asume un peso aproximado de 2.5 kg de peso total y 10 % de cemento respecto al peso de los agregados:

$$\begin{aligned}
 P_s &= 2.5 \text{ kg} && (100\% \text{ del Peso de la mezcla total de } 2.5 \text{ kg}) \\
 P_c &= 0.250 \text{ kg} && (10\% \text{ del Peso del suelo}) \\
 P_w &= 0.649 \text{ kg} && (23.61 \% \text{ del Peso Agregado mas cemento})
 \end{aligned}$$

Se presenta las dosificaciones en peso para distintas cantidades de cemento, que se utiliza en la fabricación de una briqueta.

Tabla 8. Dosificación para distintas cantidades de cemento en pesos para la fabricación de una probeta

Cantidad para una Briqueta de 2.5 kg. aprox. de mezcla		
Agua (kg)	Cemento (kg)	Suelo arcilloso (kg)
0.693	0.250	2.500
0.661	0.300	2.500
0.625	0.350	2.500

Fuente: Elaboración propia

Seguidamente, se representa la dosificación para un metro cúbico de mezcla de suelo estabilizado. Se desarrolla como ejemplo para un contenido de 10 % de cemento.

Las densidades aparentes de los materiales son:

Suelo arcilloso: 2780 kg/m³

Cemento: 2850 kg/m³

Agua: 1000 kg/m³

Las proporciones de los materiales (condición seca) usados en una mezcla prepara para el contenido de humedad óptimo son:

$$V_s = \frac{2.500 \text{ kg}}{2780 \text{ kg/m}^3} = 0.000899 \text{ m}^3$$

$$V_c = \frac{0.250 \text{ kg}}{2850 \text{ kg/m}^3} = 0.0000877 \text{ m}^3$$

$$V_w = \frac{0.649 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3} = 0.000649 \text{ m}^3$$

V total sin aire: 0.001636275 m³

Entonces podemos proporcionar para 1m³ de suelo estabilizado, donde tenemos que:

X: Volumen de cada material para 1m³ de concreto

$$\begin{array}{l} \text{Vol. cada mat.} \text{ ----- } 0.001636275 \text{ m}^3 \\ X \text{ ----- } 1 \text{ m}^3 \end{array}$$

Para 1 m³ de suelos estabilizado, multiplicar el volumen de cada material por:

$$\frac{1}{0.001636275} = 611.14$$

Suelo arcilloso: 0.549 m³ (1525.86 kg)

Cemento: 0.0536 m³ (152.70 kg)

Agua: 0.396 m³ (396.80 kg)

Tabla9. Dosificación para distintas cantidades de cemento en volumen de 1m3

Cantidad para una 1m3 de suelo estabilizado con cemento (kg)			Cant. de cemento bolsa / m3
Agua (kg)	Cemento (kg)	Suelo arcilloso (kg)	
412.500	148.810	1488.095	3.5
396.896	180.113	1500.939	4.2
379.460	212.496	1517.826	5.0

Fuente: Elaboración propia

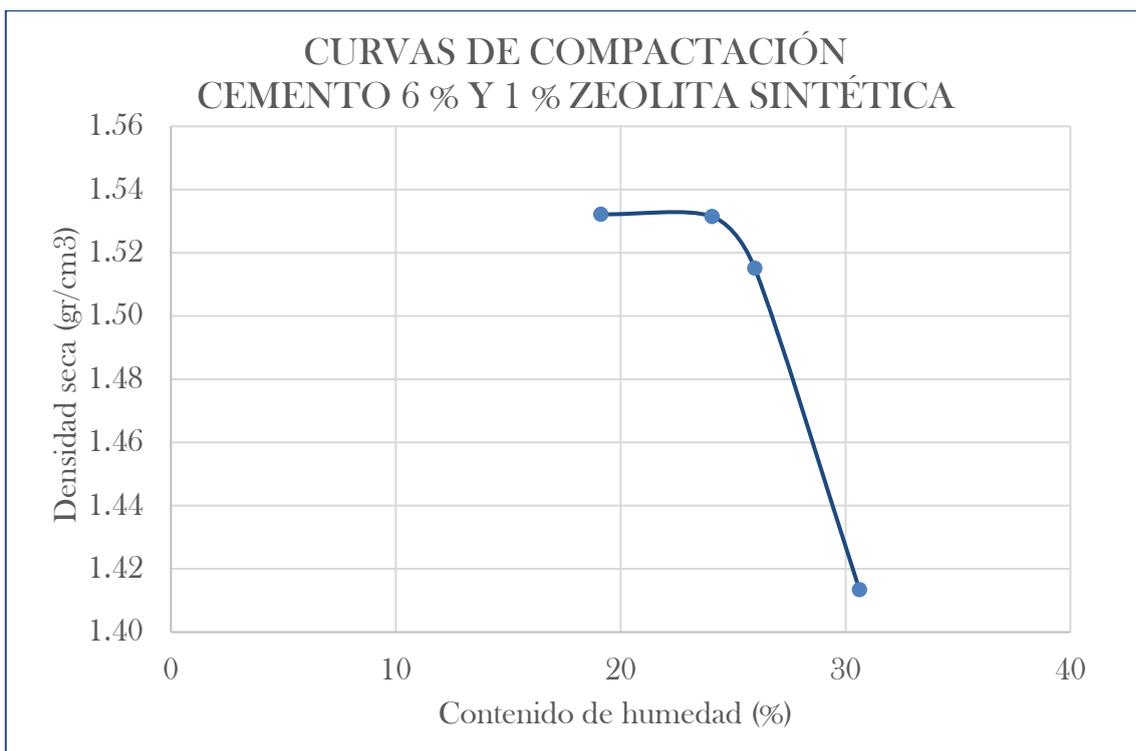
4.3. MÉTODO DE DISEÑO DE UN SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON ZEOLITA SINTÉTICA Y CEMENTO

4.3.1 DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DE HUMEDAD

Nuestro suelo es un CH, A-7-5, suelo arcilloso con plasticidad alta; por los ensayos realizados anteriormente para la estabilización con cemento, tenemos una referencia de la cantidad de cemento requerida, para este caso debe ser menor porque utilizaremos la zeolita sintética lo que debe reducir la cantidad de cemento necesaria para estabilizar el suelo arcilloso y lograr una resistencia a la compresión simple óptima para una base de un pavimento flexible tomando como valor referente el dado por Juárez Badillo y Rico Rodriguez 1997 mencionados en el punto 4.1.1.1.

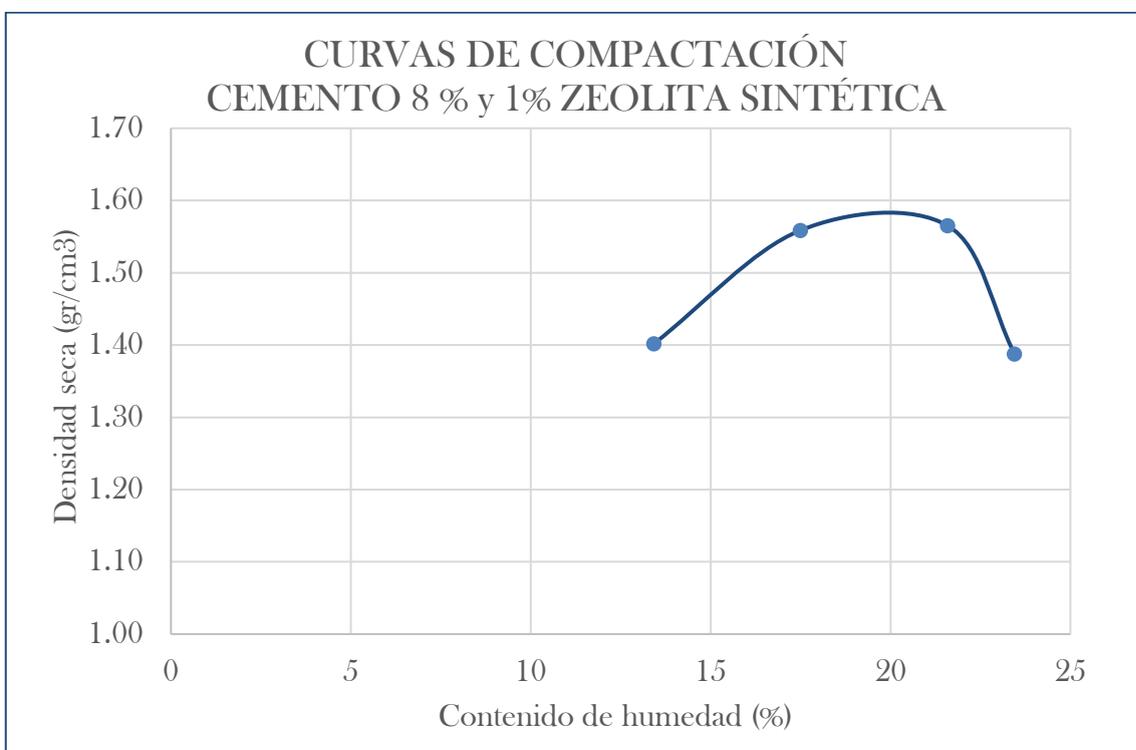
Determinaremos un contenido de humedad óptimo para una dosificación de 6%, 8% y 10% de cemento y a su vez una dosificación del 1% de zeolita sintética de cada uno de los porcentajes de cemento.

Figura 51. Curva de relación humedad – densidad al 6% de cemento y 1% de zeolita sintética



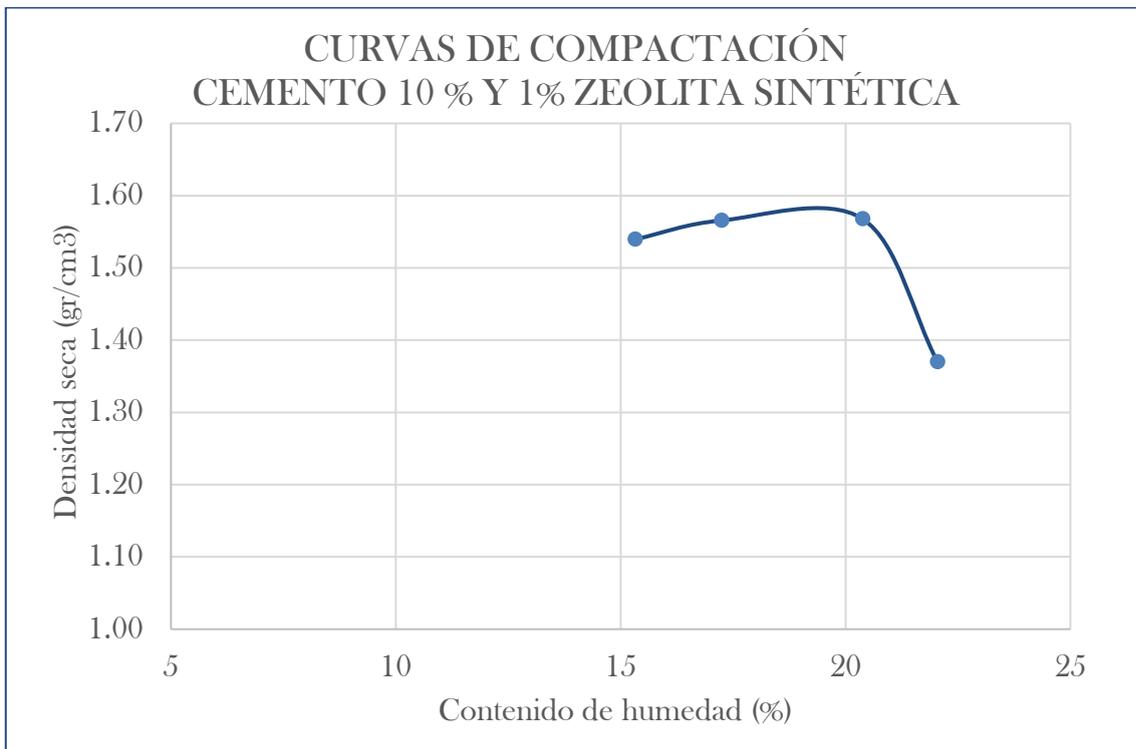
Fuente: Elaboración propia

Figura 52. Curva de Relación humedad – densidad al 8% de cemento y 1% de zeolita sintética



Fuente: Elaboración propia

Figura 53. Curva de Relación humedad – densidad al 10% de cemento y 1% de zeolita sintética



Fuente: Elaboración propia

Tabla 10. Densidad máxima seca y humedad óptima para cada porcentaje de cemento y zeolita en peso

CONTENIDO DE CEMENTO	6%	8%	10%	10%	10%
CONTENIDO DE ZEOLITA SINTÉTICA	1%	1%	1%	0.5%	1.5%
DENSIDAD MÁXIMA - MDS (gr/cm³)	1.53	1.58	1.6	1.6	1.6
HUMEDAD ÓPTIMA - OCH (%)	21.73	20.05	19.01	19.01	19.01

Fuente: Elaboración propia

4.3.1.1 PROPORCIÓN DE LOS COMPONENTES DE LA MEZCLA PARA VARIAS PROPORCIONES DE ZEOLITA SINTÉTICA Y CEMENTO

Las dosificaciones se realizaran de igual manera que se indicó en el punto 4.2.1.1. De los cuales obtenemos las siguientes proporciones:

Tabla 11. Dosificación para distintas cantidades de cemento y zeolita sintética en pesos para la fabricación de una probeta

% Cemento y % Zeolita Sintética	Cantidad para una briqueta de 2.5 kg. aprox. de mezcla			
	Agua (kg)	Zeolita sintética (kg)	Cemento (kg)	Suelo arcilloso (kg)
6% C y 1%Z	0.576	0.0015	0.150	2.500
8%C y 1%Z	0.541	0.0020	0.200	2.500
10%C y 1%Z	0.523	0.0025	0.250	2.500
10%C y 0.5%Z	0.523	0.0013	0.250	2.500
10%C y 1.5%Z	0.523	0.0038	0.250	2.500

Fuente: Elaboración propia

Tabla 12. Dosificación para distintas cantidades de cemento y zeolita sintética en volumen de 1m3

% Cemento y % Zeolita Sintética	Cantidad para una 1m ³ de suelo estabilizado con zeolita sintética y Cemento Portland IP (kg)				Cant. de cemento bolsa / m ⁴
	Agua (kg)	Cemento (kg)	Zeolita sintética (kg)	Suelo arcilloso (kg)	
6% C y 1%Z	376.922	98.183	0.982	1636.386	2.3
8%C y 1%Z	358.319	132.380	1.324	1654.746	3.1
10%C y 1%Z	346.260	165.588	1.656	1655.876	3.9
10%C y 0.5%Z	346.260	165.588	0.828	1655.876	3.9
10%C y 1.5%Z	346.260	165.588	2.484	1655.876	3.9

Fuente: Elaboración propia

4.4. ENSAYOS DE LABORATORIO

Calculadas todas las proporciones de los materiales en peso, se procedió a realizar los ensayos principales para la determinación de las propiedades mecánicas del suelo arcilloso estabilizado que corresponden a resistencia a la compresión simple, CBR.

4.4.1. ELABORACIÓN DE LOS TESTIGOS PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SUELO - CEMENTO

Las mezclas para los testigos se elaboraron individualmente de forma manual. Los moldes a utilizar son moldes cilíndricos de aproximadamente 100 mm (4 pulg.) de diámetro por 200 mm (8 pulg.) de altura. Fabricados en dos piezas de acero y debidamente ancladas en una base estable de manera que sean reusables y que poseen un espesor tal que no permita la deformación del molde debido a la compactación; además, se utilizó un desmoldante el que permitió la lubricación y evitar que el suelo estabilizado se adhiera a las paredes del molde sin alterar ninguna propiedad del suelo.

Se usaron 20 moldes de volumen y peso conocidos para poder cuantificar la densidad, además de adicionarle un collar de extensión de 2 pulgadas para permitir la compactación de la última capa.

Para la compactación de cada capa, se utilizó un compactador de 10 lbf (44.5 N) para asegurar una energía de compactación modificada de 56,250 ft – lbf/ft³; siendo la misma que se utilizó en el Proctor modificado Método A.

Figura 54. Elaboración de testigos del suelo estabilizado



Fuente: Elaboración propia

El material se dispuso en 5 capas compactadas por 25 golpes cada una, por molde debidamente lubricado, culminando con el enrazado de la última capa mediante una regla.

Los testigos de suelo estabilizado quedaron dentro del molde por 24 hrs debidamente protegidas por bolsas de plástico para luego ser extraídas del molde y colocados en un cuarto húmedo donde se tenga un temperatura de $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ envolviéndolos en bolsas de plástico y manteniéndolos húmedos hasta cumplir la edad de ensayo.

Figura 55. Desmolde y tratamiento de los testigos



Fuente: Elaboración propia

La elaboración de la muestra que va ser estabilizada con cemento es realizada en simultáneo el suelo, cemento y agua; se agrega las proporciones indicadas de agua hasta llegar a la humedad óptima y obtener una mezcla homogénea.

Listo el testigo en su tiempo de ensayo, se verifica que la prensa (calibrada) esté lista y se procede al ensayo a la compresión cuidadosamente, registrando las mediciones correspondientes para su posterior análisis y cálculos.

Esto se repite para todos los porcentajes de cemento de cada uno de los testigos.

Tabla 13. Numero de testigos para cada porcentaje de cemento

NRO DE DIAS CURADO	PORCENTAJES DE CEMENTO PORTLAND IP		
	10%	12%	14%
7 días	3	3	3
14 días	3	3	3
28 días	3	3	3

Fuente: Elaboración propia

Figura 56. Testigos del suelo estabilizado con cemento



Fuente: Elaboración propia

4.4.2. ELABORACIÓN DE LOS TESTIGOS PARA LA RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SUELO – ZEOLITA SINTÉTICA – CEMENTO

Las mezclas para los testigos se elaboraron individualmente de forma manual. Los moldes a utilizar son los mismo que se utilizaron en los testigos de suelo cemento (4.4.1)

La compactación de cada capa será al igual que los testigos de suelo – cemento por el método A de Proctor Modificado.

Las dosificaciones de zeolitas sintéticas y cemento portland deben ser con respecto a la masa volumétrica seca máxima de la curva de compactación del

suelo natural. Para cada tiempo de curado, se realizaron tres cilindros para corroborar resultados.

Una vez que se conoce la cantidad de suelo natural y zeolita sintética, se agrega el aditivo al suelo y se homogeniza la mezcla; después se guarda en una bolsa de plástico la cantidad necesaria para la compactación de cada cilindro y se deja reposar la mezcla 24 horas por ser un suelo con alto índice de plasticidad.

Figura 57. Zeolita Sintética



Fuente: Elaboración propia

Al cumplir el tiempo de reposo de la mezcla suelo – zeolita sintética, agregar la cantidad de cemento Portland que corresponde a la masa seca de la muestra y homogenizar la nueva mezcla; posteriormente, se agrega el agua y homogeniza de nuevo.

La cantidad de agua a agregar va a depender de la humedad natural de la mezcla, tiempo que se tarde en homogenizar (la mezcla y la compactación debe ser lo más rápido posible), temperatura del equipo, temperatura del ambiente al momento de homogenizar y compactar la mezcla, etc. Conforme la temperatura del ambiente aumente, se debe agregar mayor cantidad de agua.

Solo se debe agregar el cemento Portland y el agua cuando ya se va a compactar el espécimen, por ninguna razón se debe agregar si no se va a compactar inmediatamente. Tampoco se debe agregar el cemento Portland a la mezcla suelo-zeolita sintética y dejar reposar, ya que aunque no se agregue el

agua, la humedad natural del suelo hace que se inicie la hidratación del cemento Portland, por ende, su reacción.

Una vez que se tiene la mezcla suelo - zeolita sintética – cemento – agua homogéneas, se guarda el material en bolsas de plástico con la masa necesaria (2.5 kg) para cada cilindro.

Se compacta el suelo estabilizado en el molde, dividido en 5 capas y con 25 golpes por cada capa. Al sacar el testigo de cada molde, se debe rociar agua en su periferia de manera delicada evitando erosión; después envolverlo con papel periódico húmedo, identificar el cilindro y guardarlo en el cuarto de curado. En nuestro caso, no contamos con cuarto de curado por lo que se guardó en una bolsa de plástico cerrado de manera que no tenga entrada o salida de aire.

En el caso de usar una bolsa de plástico como cuarto de curado, se debe rociar el cilindro cada 24 hrs con agua hasta que se llegue el tiempo de ensayo. Se debe asegurar que la bolsa de plástico quede perfectamente cerrada.

Esto se repite para todos los porcentajes de cemento de cada uno de los testigos.

Tabla 14. Número de testigos para cada porcentaje de cemento y 1% de zeolita sintética

NRO. DE DÍAS CURADO	PORCENTAJES DE CEMENTO Y 1% DE ZEOLITA SINTÉTICA				
	6%C Y 1%Z	8%C Y 1% Z	10%C Y 1 %Z	10%C Y 0.5 %Z	10%C Y 1.5 %Z
7 días	3	3	3	3	3
14 días	3	3	3	3	3
28 días	3	3	3	3	3

Fuente: Elaboración propia

Figura 58. Testigos del suelo estabilizado con cemento y zeolita sintética



Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO V

ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. PROPIEDADES DEL SUELO ARCILLOSO NATURAL

5.1.1. CLASIFICACIÓN DEL SUELO AASHTO

Tabla 15. Clasificación del suelo según AASHTO

Parámetros usados					
% que pasa la malla n° 200		81.11			
% que pasa la malla n° 40		91.88	Determinación del índice de grupo IG		
% que pasa la malla n° 10		98.23	a =	40.00	IG = 20.00
límite líquido	<i>LL</i> =	82.41 %	b =	40.00	
Límite plástico	<i>LP</i> =	35.76 %	c =	20.00	
Índice de plasticidad	<i>IP</i> =	46.65 %	d =	20.00	

Tipo de suelo	Material Limo Arcilloso	
Clasificación de suelos	A - 7	
Suelo	A - 7 - 5 (20)	
Tipo de material	Suelo arcilloso	
Terreno de fundación	Regular a malo	
Tipo de suelo según su granulometría	Suelo fino alta plasticidad	
Tipo de simbología	Simbología Normal	
Tipo de suelo	CH , MH , OH	
Suelo	CH	

Fuente: Elaboración propia

Figura 59. Suelo arcilloso natural



Fuente: Elaboración propia

5.1.2. GRAVEDAD ESPECÍFICA

Tabla 16. Gravedad específica del suelo arcilloso natural

ENSAYO	UND	1	2
Temperatura	°C	19.9	20
Peso de la muestra superf. seca	gr	284	293.9
Peso de la fiola	gr	185	158.7
Volumen de la fiola (20°C)	cm ³	498.9	500.1
Peso de fiola + agua	gr	683.76	657.53
Peso de la muestra + fiola + agua	gr	865.6	845.5
Peso específico del agua	gr/cm ³	0.9982	0.9982
Peso específico relativo de los sólidos (Gs)	gr/cm ³	2.78	2.77
Peso específico relativo de los sólidos (Gs)	gr/cm ³	2.8	

Fuente: Elaboración propia

Figura 60. Prueba de la gravedad específica del suelo arcilloso natural



Fuente: Elaboración propia

5.1.3. PROCTOR MODIFICADO

Tabla 17. Ensayo de Proctor Modificado del suelo arcilloso natural

VOLUMEN DEL MOLDE :		cm ³					
		947.89					
PRUEBA N°		1	2	3	4	5	6
Peso suelo + molde	gr	5817	5872	5924	5956	5986	5976
Peso molde	gr	4175	4175	4175	4175	4175	4175
Peso suelo húmedo compactado	gr	1642	1697	1749	1781	1811	1801
Peso suelo húmedo + tara	gr	400	673	568	860	713	823
Peso del suelo seco + tara	gr	351	580	481	719	586	655
Tara	gr	0	0	0	0	0	0
Peso del agua	gr	49	93	87	141	127	168
Peso del suelo seco	gr	351	580	481	719	586	655
Contenido de agua	%	13.96	16.03	18.09	19.61	21.67	25.65
Peso volumétrico húmedo	gr/cm ³	1.73	1.79	1.85	1.88	1.91	1.90
Peso volumétrico seco	gr/cm ³	1.52	1.54	1.56	1.57	1.57	1.51
DENSIDAD MÁXIMA - MDS (gr/cm³)							1.57
HUMEDAD ÓPTIMA - OCH (%)							21.60

Fuente: Elaboración propia

Figura 61. Ensayo de Proctor Modificado del suelo arcilloso natural



Fuente: Elaboración propia

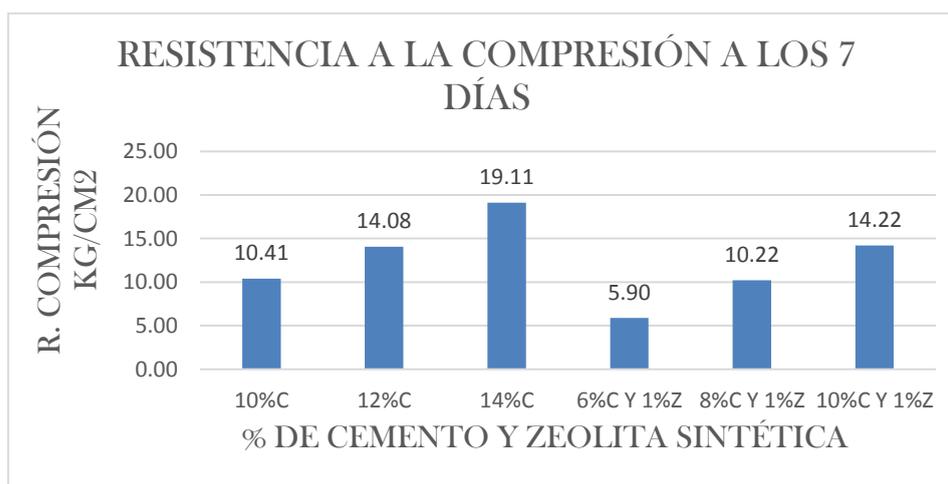
5.2. DETERMINACIÓN DEL CONTENIDO ÓPTIMO DEL SUELO ARCILLOSO – CEMENTO – ZEOLITA SINTÉTICA

Tabla 18. Resistencia a la compresión del suelo estabilizado

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN				
PORCENTAJE EN PESO DE CEMENTO	PORCENTAJE EN PESO DE ZEOLITA SINTÉTICA	RESISTENCIA A LA COMPRESION (KG/CM2)		
		7 DÍAS	14 DÍAS	28 DÍAS
10%	-	10.41	11.79	13.62
12%	-	14.08	15.71	17.24
14%	-	19.11	20.04	21.07
6%	1%	5.90	6.84	9.39
8%	1%	10.22	11.73	14.30
10%	1%	14.22	16.67	19.66

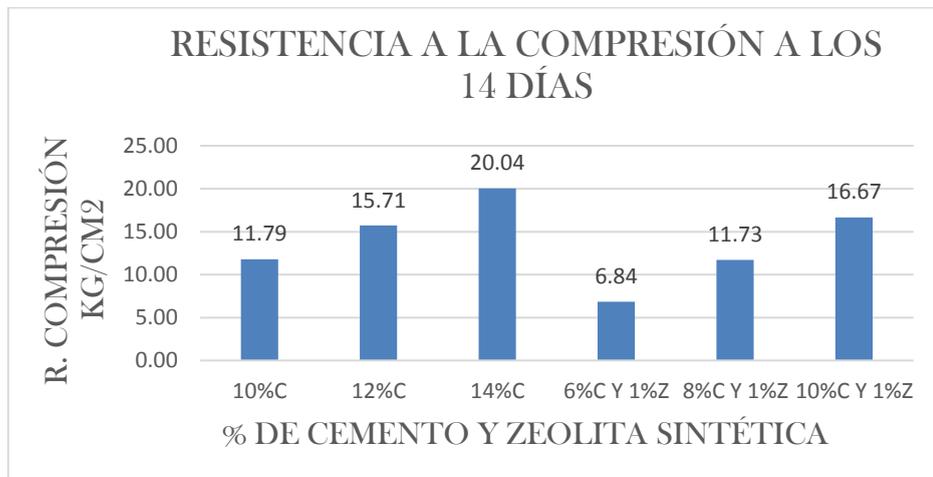
Fuente: Elaboración propia

Figura 62. Resistencia a la compresión del suelo estabilizado a la edad de 7 días



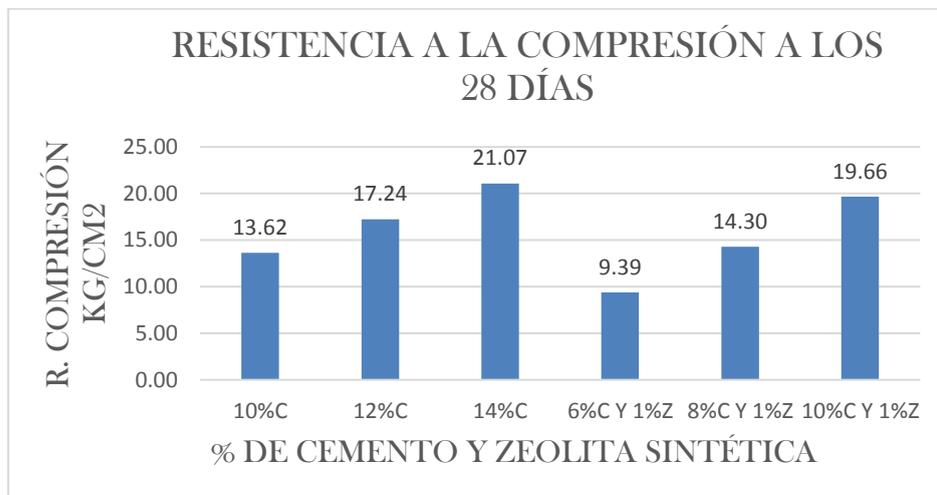
Fuente: Elaboración propia

Figura 63. Resistencia a la compresión del suelo estabilizado a la edad de 14 días



Fuente: Elaboración propia

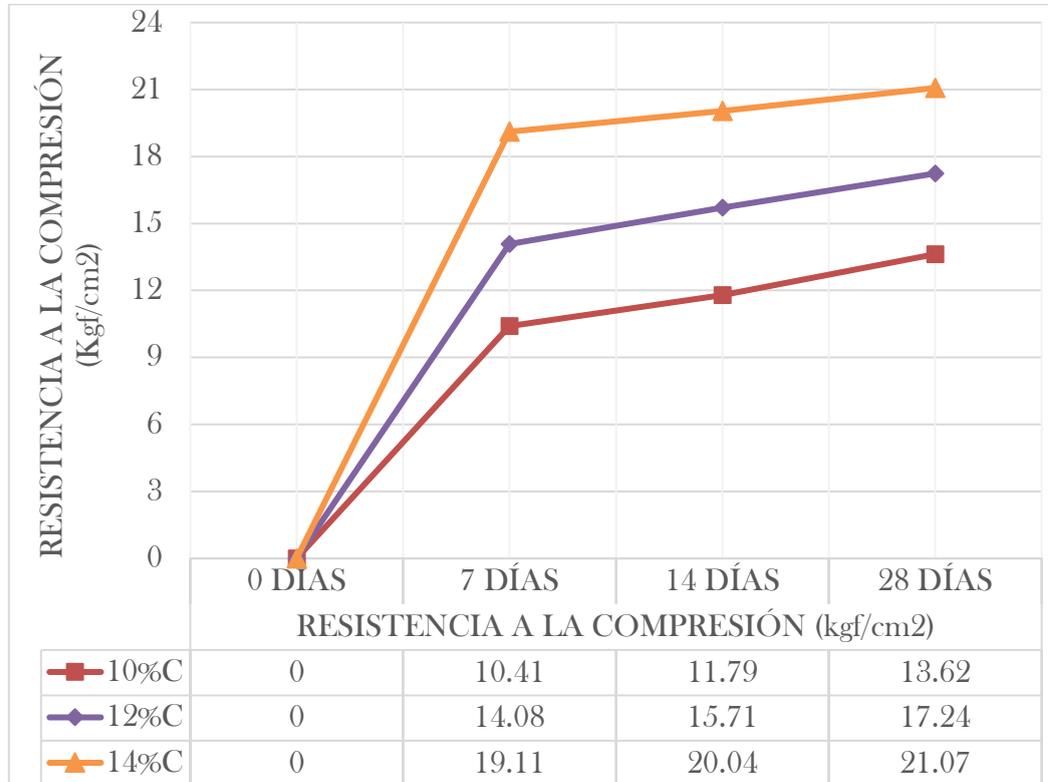
Figura 64. Resistencia a la compresión del suelo estabilizado a la edad de 28 días



Fuente: Elaboración propia

5.2.1. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DEL SUELO – CEMENTO

Figura 65. Evolución de la resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 10%, 12% y 14% para edades de 7,14 y 28 días



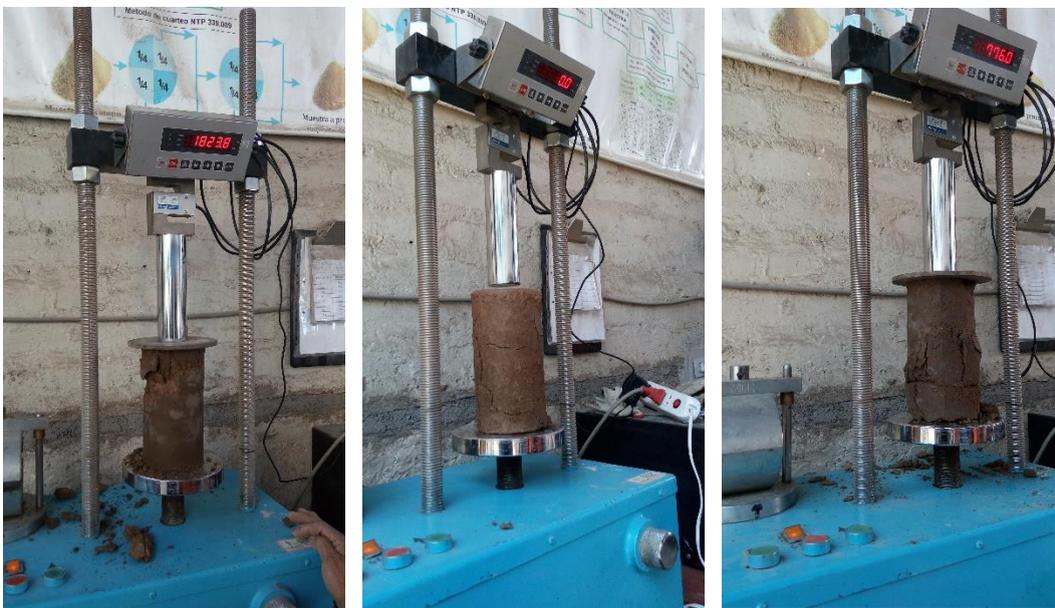
Fuente: Elaboración propia

Figura 66. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 10%, 12% y 14% para edades de 7,14 y 28 días



Fuente: Elaboración propia

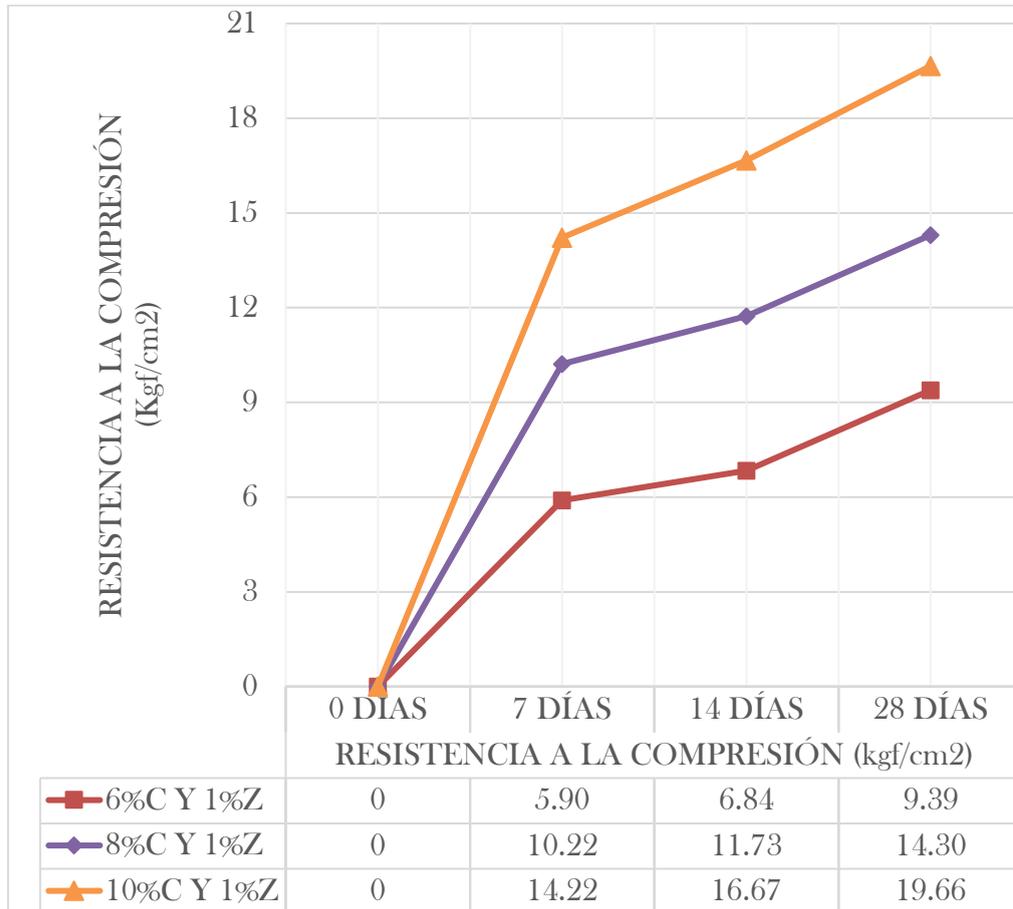
Figura 67. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 10%, 12% y 14% para edades de 7,14 y 28 días



Fuente: Elaboración propia

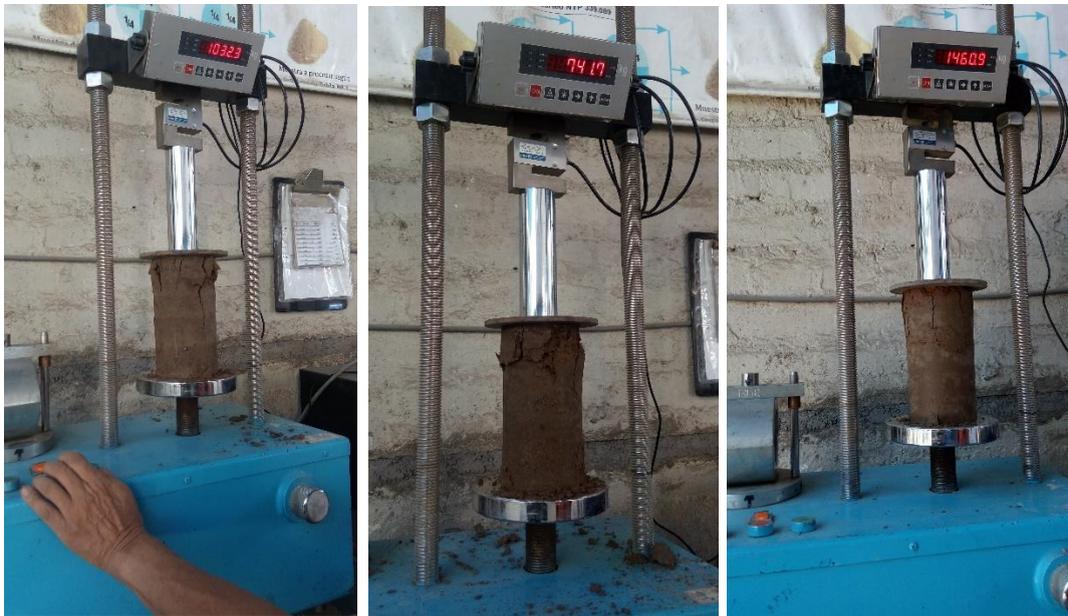
5.2.2. RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN SIMPLE DEL SUELO – CEMENTO – ZEOLITA SINTÉTICA

Figura 68. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 6%, 8% y 10%, 1% de zeolita sintética para edades de 7,14 y 28 días



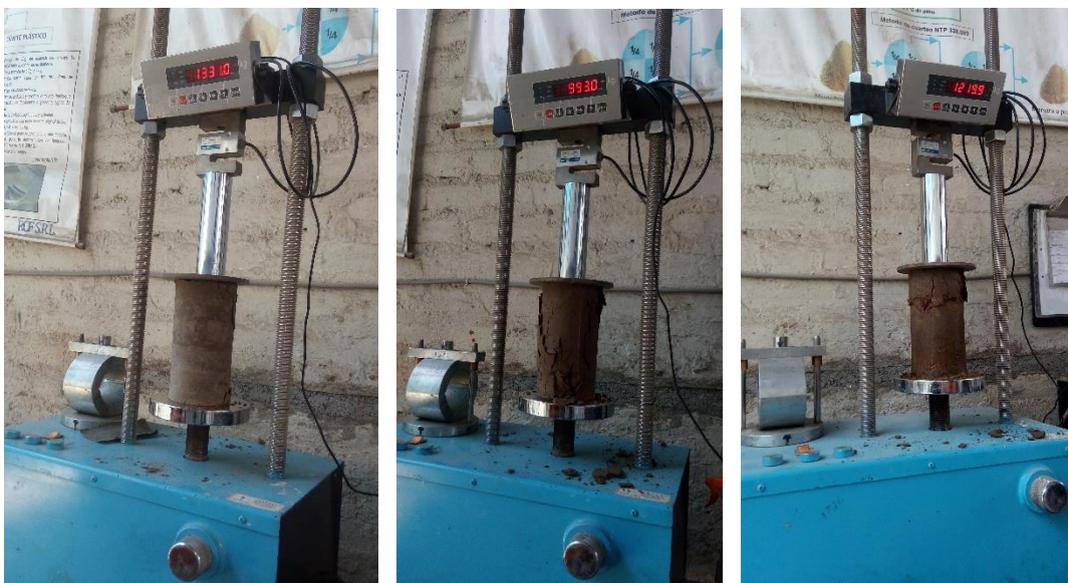
Fuente: Elaboración propia

Figura 69. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 6%, 8% y 10%, 1% de zeolita sintética para edades de 7,14 y 28 días



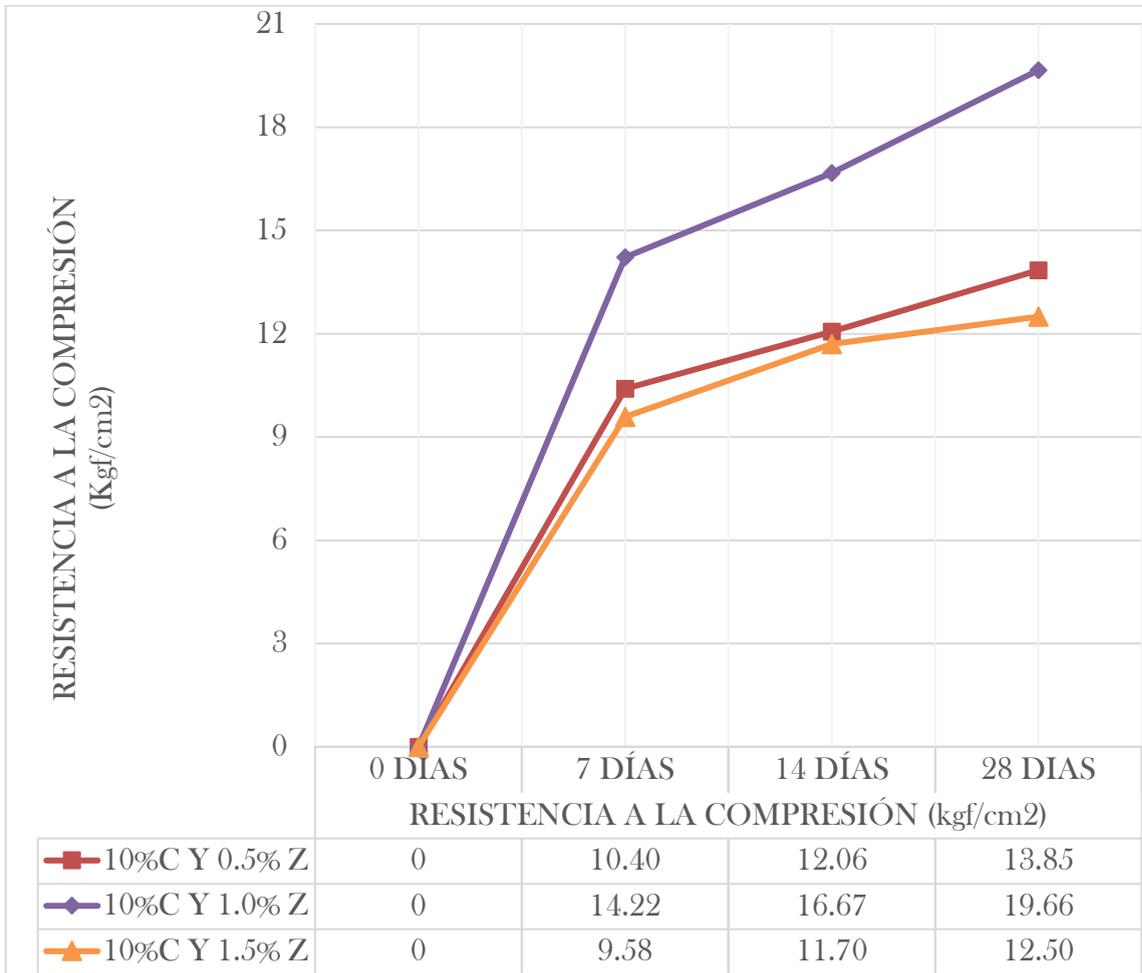
Fuente: Elaboración propia

Figura 70. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 6%, 8% y 10%, 1% de zeolita sintética para edades de 7,14 y 28 días



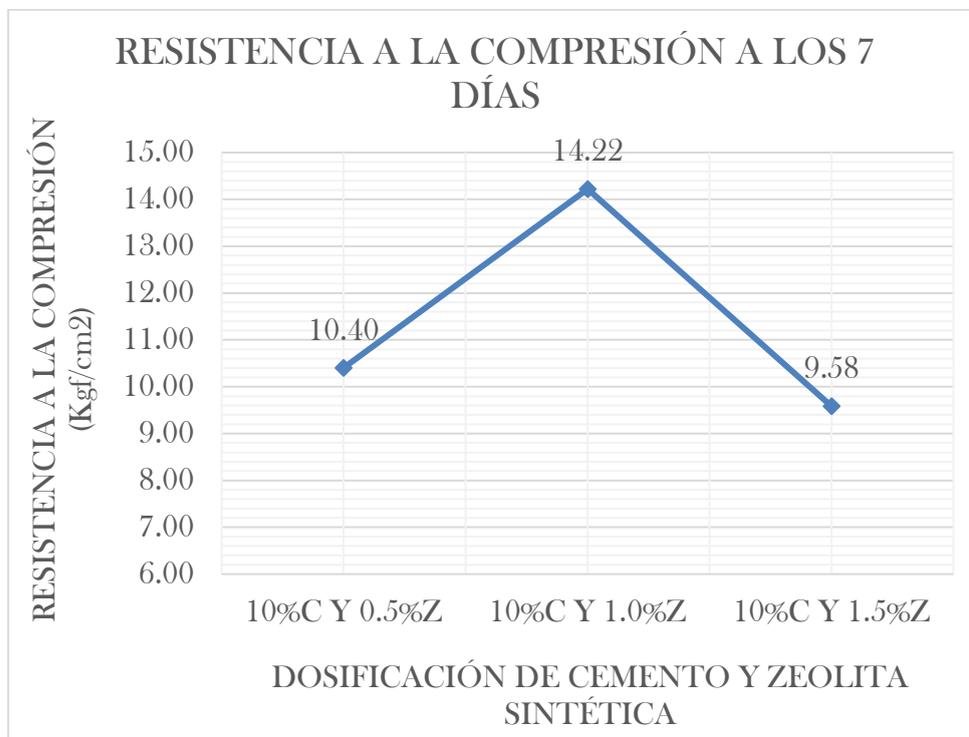
Fuente: Elaboración propia

Figura 71. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento: 10% y 0.5%, 1%, 1.5% de zeolita sintética para edades de 7,14 y 28 días



Fuente: Elaboración propia

Figura 72. Ensayo de resistencia a la compresión de cantidades de cemento 10% y 0.5%, 1%, 1.5% de zeolita sintética para edad de 7 días



Fuente: Elaboración propia

Figura 73. Ensayo de Resistencia a la compresión de cantidades de cemento 10% y 0.5%, 1%, 1.5% de zeolita sintética



Fuente: Elaboración propia

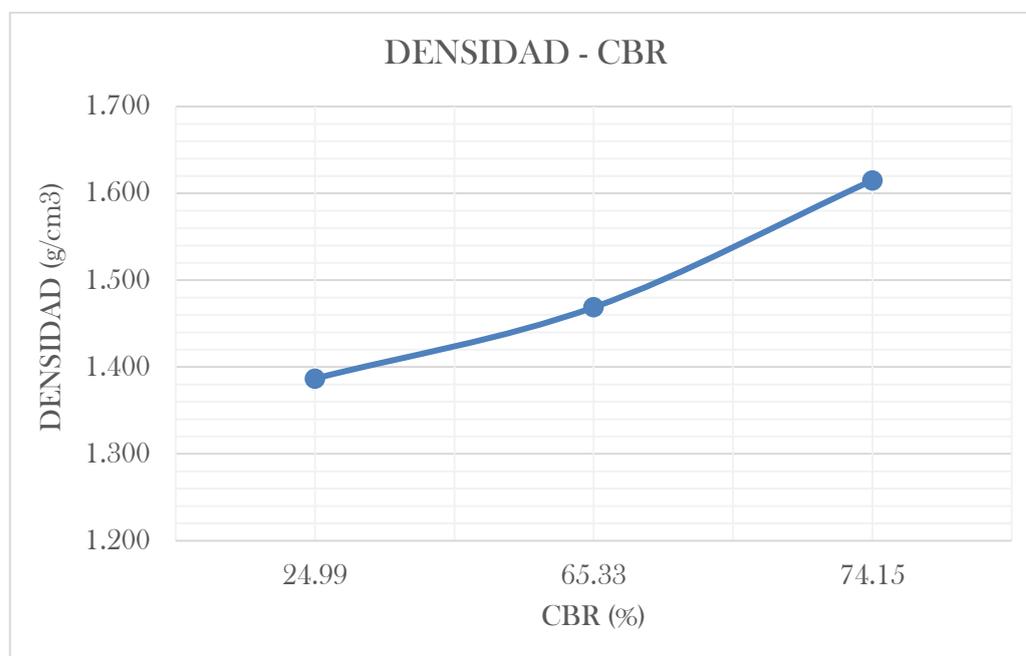
5.2.3. RELACIÓN DE SOPORTE CALIFORNIA DEL SUELO ESTABILIZADO (CBR)

Tabla 19. Relación del Soporte California (CBR) expansión a los 7 días de sumergidas en agua del suelo estabilizado con 10% de cemento y 1% de zeolita sintética

EXPANSIÓN							
Fecha	Tiempo	Dial	Expans. Pulg.	Dial	Expans. Pulg.	Dial	Expans. Pulg.
31/10/2016	0	0.041	0.02	0.570	0.2244	0.041	0.0161
03/11/2016	72 h	0.181	0.07	0.725	0.2854	0.181	0.0713
ALTURA INICIAL (pulg)		11.56	4.55	11.56	4.55	11.56	4.55
Expansión % de altura inicial		1.21%		1.34%		1.21%	

Fuente: Elaboración propia

Figura 74. Ensayo de relación de Soporte California (CBR) a 7 días de sumergidas en agua del suelo estabilizado con 10% de cemento y 1% de zeolita sintética



Fuente: Elaboración propia

Tabla 20. Relación de Soporte California (CBR) a los 7 días de sumergidas en agua del suelo estabilizado con 10% de cemento y 1% de zeolita sintética

CBR al 100% de Máxima Densidad =	74.15%
CBR al 95% de Máxima Densidad =	64.14%

Fuente: Elaboración propia

5.2.4. PROPIEDADES PLÁSTICAS DEL SUELO ESTABILIZADO

Tabla 21. Ensayo de Límites de Atterberg del suelo estabilizado con 10% de cemento y 1% de zeolita sintética

LIMITES DE CONSISTENCIA		
Límite líquido:	LL =	50.06%
Límite plástico:	LP =	46.14%
Índice de plasticidad :	IP =	3.92%

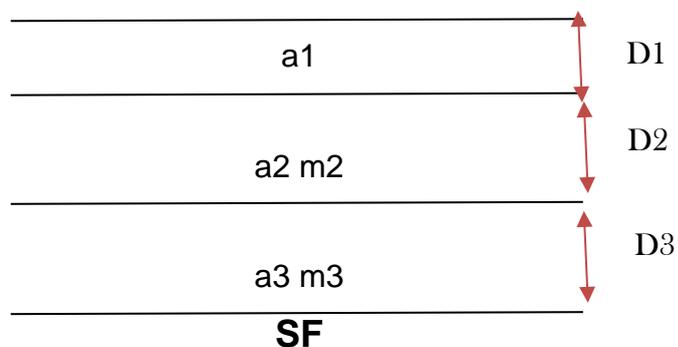
Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO VI

DISEÑO Y COSTO DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

6.1. DATOS DE ENTRADA PARA EL DISEÑO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO CONVENCIONAL, MÉTODO AASHTO 93

Este método utiliza el concepto de número estructural en función a los experimentos de la WASHO. Este método aplica o cuantifica las propiedades del material asignándoles un coeficiente de capa y los afecta por un coeficiente de drenaje, este es multiplicado por el espesor y se obtiene un número estructural de diseño vs. un número estructural requerido.



a1, a2, a3 = Coeficientes estructurales de capa

m2, m3 = coeficiente de drenaje

D1, D2, D3 = espesores de capa de cada tipo diferente

Cabe indicar que los coeficientes ai, responden a un cálculo rigurosos de sus propiedades esfuerzo – deformación.

6.1.1. DRENAJE

El drenaje es un factor importante en la estabilidad de un pavimento por lo cual en este método incide directamente sobre el número estructural.

Debemos entender el drenaje como un fenómeno que causa migración de partículas originando erosión, saturación y sobrepresión, ablandamiento del material y degradación del mismo.

Tabla 22. Calidad de drenaje de un pavimento

CALIDAD DEL DRENAJE	50 % SATURACIÓN	85% SATURACIÓN
EXCELENTE	2 h	2 hrs
BUENO	1 día	2-5 hrs
REGULAR	1 semana	5-10 hrs
POBRE	1 mes	+ 10 hrs
MUY POBRE	No drena	++ 10 hrs

Fuente: Ing. Rafael Menéndez Ingeniería de Pavimentos ICG, 2012

Tabla 23. Coeficiente de bases y subbases

CALIDAD	% del tiempo que la estructura está expuesta a niveles próximos de saturación			
	< 1%	1-5%	5-25%	>25%
EXCELENTE	1,40 - 1,35	1,35 - 1,30	1,30 - 1,20	1,20
BUENO	1,35 - 1,25	1,25 - 1,15	1,15 - 1,00	1,0
REGULAR	1,25 - 1,15	1,15 - 1,05	1,00 - 0,80	0,8
MALO	1,15 - 1,05	1,05 - 0,80	0,80 - 0,60	0,6
MUY MALO	1,05 - 0,95	0,95 - 0,75	0,75 - 0,45	0,4

Fuente: Ing. Rafael Menéndez Ingeniería de Pavimentos ICG, 2012

Arequipa presenta un clima muy expuesto a niveles de saturación; puesto que 4 meses del año son de temporada lluviosa, por lo que se toma en cuenta como un 33% anual.

6.1.2. CONFIABILIDAD

Es el enfoque relacionado con la variabilidad sobre todo en la fase de diseño, también construcción, manteniendo y confiabilidad en términos de pavimentos es la probabilidad que el sistema estructural que conforma el pavimento cumpla su función prevista dentro de su vida útil bajo condiciones ambientales que tengan lugar en ese lapso.

Un nivel de confiabilidad alta de un pavimento es más costoso, incluye mayores costos iniciales pero mayor tiempo para reparación.

Tabla 24. Valores de confiabilidad recomendados por AASHTO

CLASIFICACIÓN FUNCIONAL	NIVEL RECOMENDADO DE CONFIABILIDAD	
	URBANA	RURAL
Interestatales y otras vías expresas	85 - 99.9	80 - 99.9
Arterias principales	80 - 99	75 - 95
Vías colectoras	80 - 95	75 - 95
Locales	50 - 80	50 - 80

Fuente: AASHTO 1993

La confiabilidad en el diseño de pavimentos (Z_r) es la probabilidad de que el sistema estructural que forma el pavimento cumpla su función prevista bajo las condiciones que tienen lugar en ese lapso.

$$\text{CONFIABILIDAD} = R (\%) = 100 \times \text{Probabilidad} (N_f > N_T)$$

Tabla 25. Valores de desviación estándar normal de acuerdo a la confiabilidad

Confiabilidad (R%)	Desviación estándar normal (Z _R)
50%	0.000
60%	-0.253
70%	-0.524
75%	-0.674
80%	-0.842
85%	-1.036
90%	-1.282
91%	-1.341
92%	-1.405
93%	-1.476
94%	-1.555
95%	-1.645
96%	-1.751
97%	-1.881
98%	-2.054
99%	-2.326
99.9%	-3.090
99.99%	-3.719

Fuente: Ing. Rafael Menéndez Ingeniería de Pavimentos ICG, 2012

6.1.3. SERVICIABILIDAD

La serviciabilidad representa el confort o comodidad de circulación que la vía ofrece al usuario, su valor está comprendido entre 5 (condición máxima ideal) y 0 para una condición de completo deterioro.

Es la capacidad de servicio al tránsito a servir para el cual ha sido diseñada, se evalúa con el IRI (índice de rugosidad internacional), y se considera 4,5 como inicial para pavimentos flexibles y de 2,5 como IRI final.

6.1.4. DESVIACIÓN ESTÁNDAR

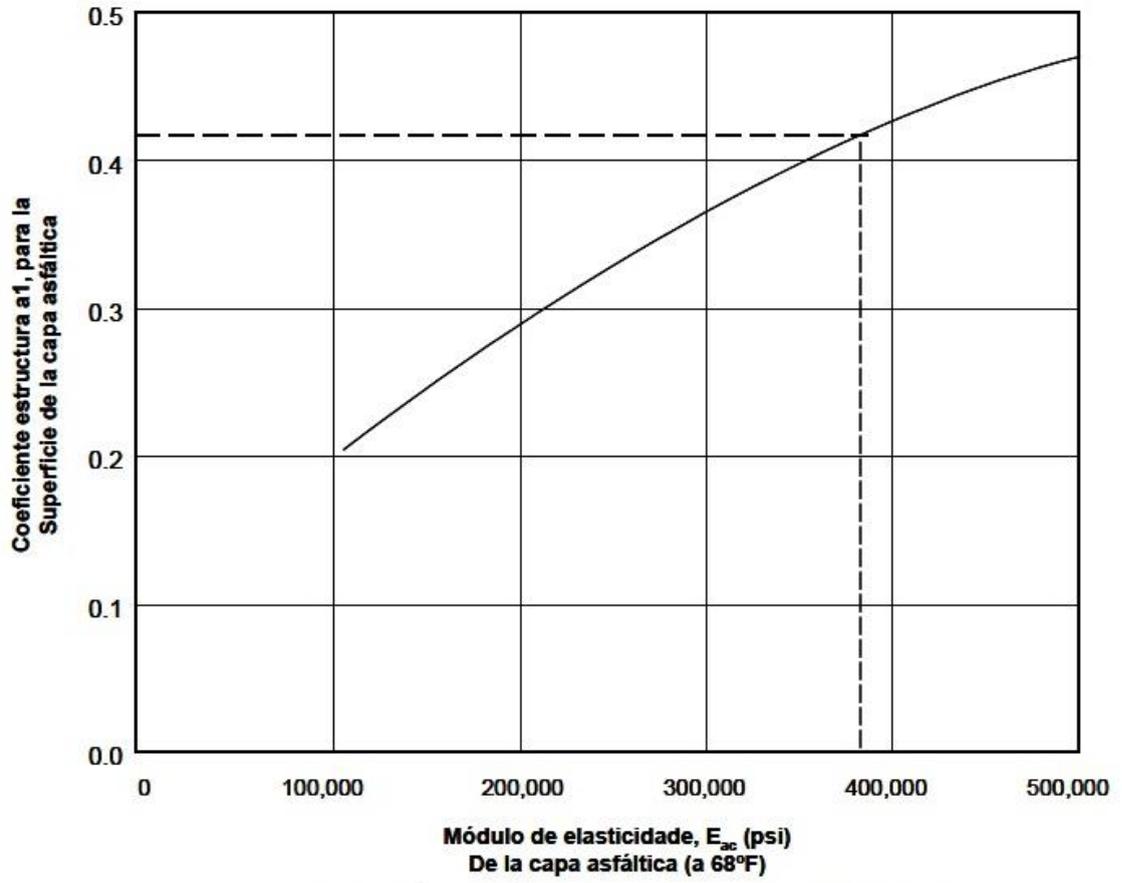
La desviación estándar combinada (S_o), es un valor que toma en cuenta la variabilidad esperada de la predicción del tránsito y de los otros factores que afectan el comportamiento del pavimento; por ejemplo, construcción, medio ambiente e incertidumbre del modelo. La guía AASHTO recomienda que estos varíen entre 0,4 a 0.5 para pavimentos flexibles; 0.39, para pavimentos rígidos y 0.49 para flexibles; cuando se considera variación de tráfico.

Así mismo 0,34 para pavimentos rígidos y 0.44 para pavimentos flexibles; cuando no se considera variación en el tráfico.

6.1.5. COEFICIENTES ESTRUCTURALES DE CAPA

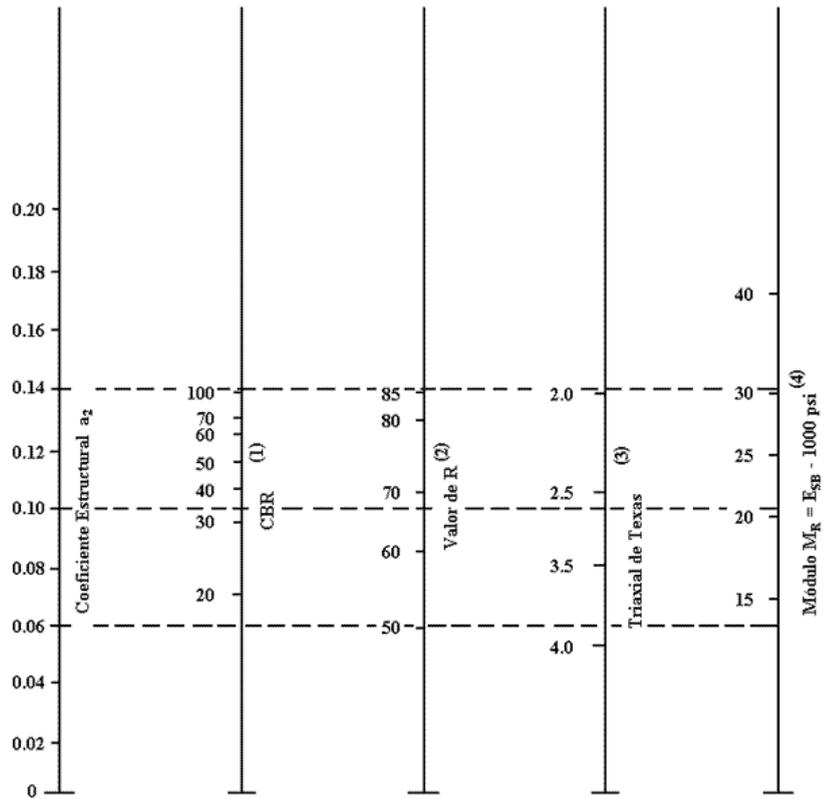
El coeficiente estructural de capa es una medida de la capacidad relativa de una unidad de espesor de un determinado material para funcionar como un componente estructural del pavimento.

Figura 75. Coeficiente estructural de la capa de la carpeta asfáltica



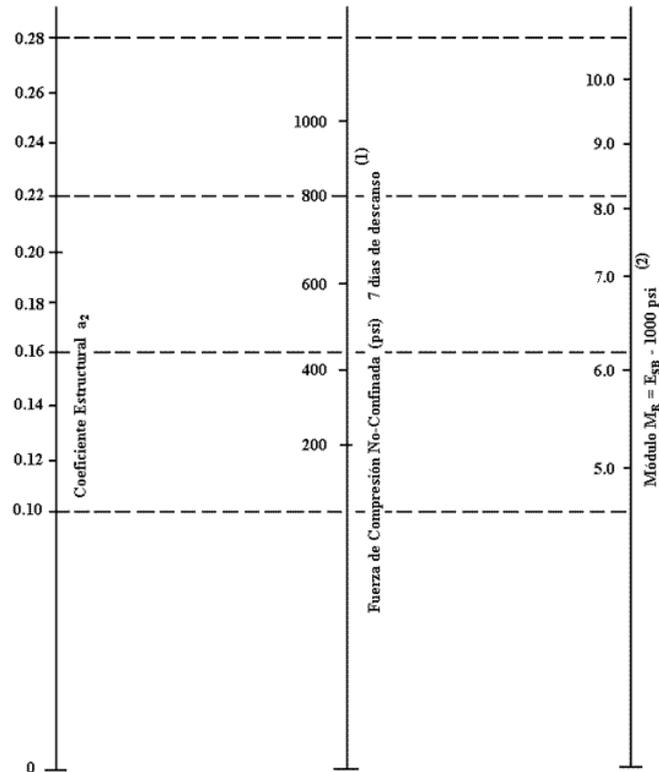
Fuente: AASHTO 1993

Figura 76. Coeficiente estructural de la capa de la base granular, sin tratar



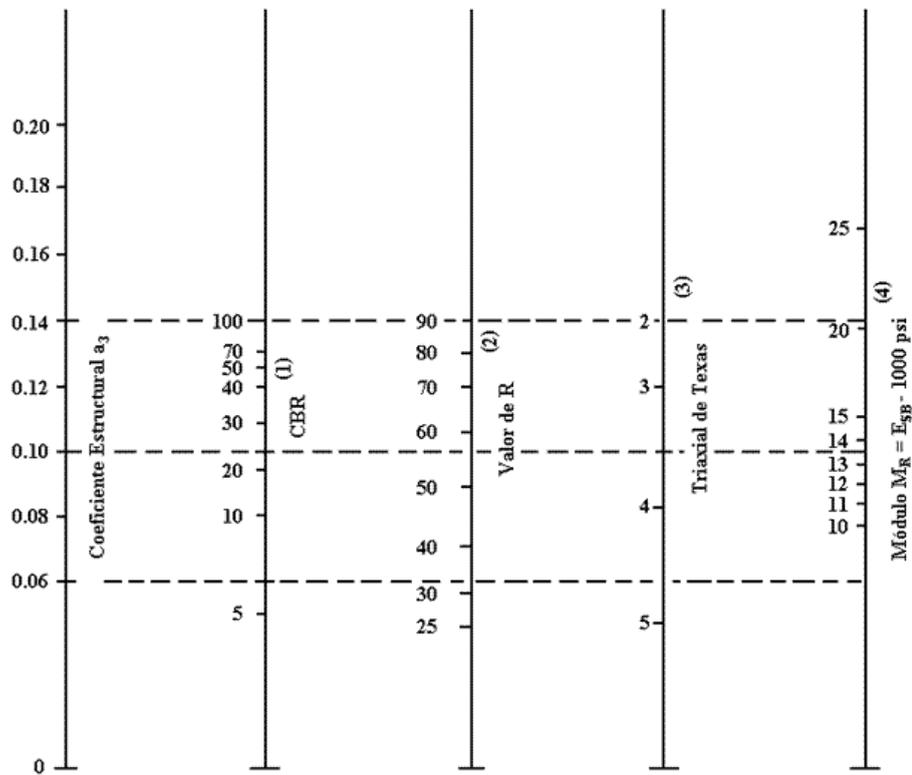
Fuente: AASHTO 1993

Figura 77. Coeficiente estructural de la capa de la base granular, estabilizada con cemento



Fuente: AASHTO 1993

Figura 78. Coeficiente estructural de la capa de la subbase granular



Fuente: AASHTO 1993

6.2. DISEÑO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO CONVENCIONAL, MÉTODO AASHTO 93

$$\log W_{18} = Z_r * S_0 + 9.36 \log(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log\left(\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5}\right)}{0.40 + \left(\frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}\right)} + 2.32 \log MR - 8.07$$

W18 = # de aplicaciones de carga de 80 KN

Zr = confiabilidad

So = desvío estándar de las variables

PSI = variación de serviciabilidad prevista en el diseño

MR = Módulo resiliente de la subrasante

SN = Número estructural

$$CBR < 6\% \quad MR = 1500 \text{ CBR}$$

$$6 < \text{CBR} < 30\% \quad \text{MR} = 4726 \ln \text{CBR} + 243$$

$$\text{CBR} > 30\% \quad \text{MR} = 2555 \times \text{CBR}^{0.64}$$

Tabla 26. Clasificación de tráfico

CLASIFICACIÓN DE TRAFICO	ESAL	TIPO DE CALLE O AVENIDA	RANGO APROX. DE CAMIONES ESPERADOS DURANTE EL PERIODO
I	5×10^3	-Estacionamiento -Tráfico ligero residencial -Camiones rurales de tráfico ligero	<7,000
II	10^4	-Calles residenciales -Vías rurales	7,000-15,000
III	10^5	-Colectores urbanas menores -Colectores rurales menores	70,000-150,000
IV	10^6	-Arteriales urbanas menores y vías industriales ligeras -Colectoras mayores rurales y vías arteriales menores	700,000-1'500,000
V	3×10^6	-Vías expresas urbanas y otras autopistas arteriales principales -Interestatales rurales y otras autopistas arteriales principales	2'000,000-4'500,000
VI	10^7	-Vías interestatales urbanas -Algunas vías industriales	7'000,000-15'000,000

Fuente: Asphalt Institute 2000

El diseño de nuestro pavimento será tomando en cuenta los siguientes valores referenciales:

Tabla 27. Valores para el diseño del pavimento flexible convencional

W 18	2,1 x 10 ^ 6
△ PSI	2,2
So	0,49
Zr	1,282
CBR S. FUNDACION	2.20%
CBR SUB BASE	40%
CBR BASE	100%
MR SUB BASE	3300
MR BASE	27083.78
MR PAVIMENTO	48684.52
a1	0.44
a2	0.14
a3	0.12
mi	0.80

Fuente: Elaboración propia

$$SN = SN1 + SN2 + SN3$$

$$SN = a1 D1 + a2 mi D2 + a3 mi D3$$

$$SN1 = a1 D1$$

$$D1 = \frac{1.9266}{0.44} = 4.37 = 4.5 \text{ pulg}$$

$$SN1^* = a1 D1^*$$

$$SN1^* = 1.98 \text{ pulg}$$

$$SN2 = 2.4004$$

$$D2 = \frac{(SN2 - SN1^*)}{a2 \cdot mi} = 3.75 = 4 \text{ pulg}$$

Se recomienda ordenar los espesores de la capa de menor a mayor, empezando de las capas superiores; esto quiere decir que el espesor de la carpeta asfáltica debe ser menor que la de la base y así sucesivamente, para ello se puede forzar los espesores, es decir, según la metodología AASHTO. Los espesores obtenidos son los mínimos los cuales se pueden incrementar y con estos espesores corregidos diseñar las capas inferiores.

$$D2 = 5,5 \text{ pulg}$$

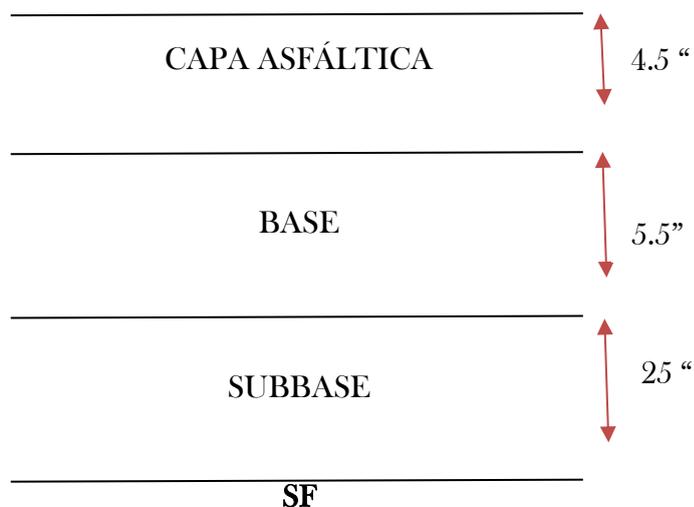
$$SN2^* = a2 \text{ mi } D2 + SN1^*$$

$$SN2^* = 0.14 \times 0.80 \times 5.5 + 1.98$$

$$SN2^* = 2.59 \text{ pulg}$$

$$SN3 = 4.926$$

$$D3 = \frac{(SN3 - SN2^*)}{a3 \cdot mi} = 24.33 = 25 \text{ pulg}$$



6.3. COSTO DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO CONVENCIONAL

Presupuesto

PAVIMENTACIÓN DE UNA VÍA DE 3 500m DE LONGITUD Y 7.20m DE ANCHO EN UN SUELO ARCILLOSO, PAVIMENTO FLEXIBLE EN FRÍO TOMAMOS EN CUENTA QUE LA OBRA SE ENCUENTRA A UNA DM DE 60 KM DE UNA CANTERA

AREQUIPA - AREQUIPA

<i>Ítem</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Metrado</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	<i>Subtotal</i>	<i>Total</i>
01	<u>OBRAS PROVISIONALES</u>						
01.01	CARTEL DE LA OBRA (3.60 X 8.50M - C/BANNER)	UND	1.00	500.00	500.00	500.00	500.00
02	<u>TRABAJOS PRELIMINARES</u>						
02.01	MOVILIZACIÓN Y DESMOVILIZACIÓN DE EQUIPOS Y/O MAQUINARIA	GLB	1.00	5 000.00	5 000.00		
02.02	TRAZO, NIVELACIÓN Y REPLANTEO PRELIMINAR	M2	25 200.00	1.81	45 612.00		
02.03	TRAZO NIVELACIÓN Y REPLANTEO DURANTE LA OBRA	M2	25 200.00	1.68	42 411.60	93 023.60	93 023.60
03	<u>MITIGACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL</u>						
03.01	RIEGO DE VÍA CON TANQUE CISTERNA	M2	75 600.00	0.71	53 676.00		
03.02	PROGRAMA Y MANEJO DE MONITOREO AMBIENTAL	GLB	1.00	950.00	950.00	54 626.00	54 626.00
04	<u>MOVIMIENTO DE TIERRAS</u>						
04.01	DESBROCE Y LIMPIEZA DE TERRENO	M2	25 200.00	1.30	32 760.00		
04.02	CORTE MASIVO DE TERRENO A MÁQUINA	M3	34 272.00	16.00	548 352.00		
04.03	NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN DE SUBRASANTE	M2	25 200.00	9.94	250 488.00		
04.04	ELIMINACIÓN DE MATERIAL EXCEDENTE	M3	85 044.96	13.84	1 177 022.25	2 008 622.25	2 008 622.25
05	<u>PAVIMENTOS</u>						
05.01	<u>SUBBASE</u>						
05.01.01	CARGUÍO DE MATERIAL PARA SUBBASE	M3	16 002.00	15.00	240 030.00		
05.01.02	TRANSPORTE DM=60.00 KM	M3	16 002.00	54.28	868 636.11		
05.01.03	REFINE Y COMPACTACIÓN DE SUBRASANTE	M2	25 200.00	3.70	93 240.00		
05.01.04	EXTENDIDO Y COMPACTACIÓN DE SUBBASE	m2	25 200.00	43.51	1 096 452.00	2 298 358.11	
05.02	<u>BASE</u>						
05.02.01	CARGUÍO DE MATERIAL PARA BASE	M3	3 293.64	19.80	65 214.07		
05.02.02	TRANSPORTE DM=60.00 KM	M3	3 293.64	54.28	178 788.57		
05.02.03	EXTENDIDO Y COMPACTACIÓN DE BASE GRANULAR	m2	25 200.00	43.51	1 096 452.00	1 340 454.64	
05.03	<u>IMPRIMACIÓN</u>						
05.03.01	IMPRIMACIÓN ASFÁLTICA	M2	25 200.00	5.76	145 152.00		
05.03.02	ARENADO DE SUPERFICIE IMPRIMADA	m2	25 200.00	1.37	34 524.00		
05.03.03	BARRIDO DE SUPERFICIE IMPRIMADA	M2	25 200.00	5.82	146 664.00	326 340.00	
05.04	<u>CARPETA ASFÁLTICA EN FRÍO E=4.5"</u>						
05.04.01	PREPARACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO	M2	25 200.00	20.03	504 756.00		
05.04.02	CARGUÍO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO	M3	2 880.36	2.34	6 740.04		
05.04.03	TRANSPORTE DE MEZCLA ASFÁLTICA A OBRA	M3	2 880.36	4.08	11 751.87		
05.04.04	RIEGO DE LIGA CON LÍQUIDO ASFÁLTICO	M2	25 200.00	3.27	82 404.00		

05.04.05	EXTENDIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO	M2	25 200.00	2.33	58 716.00		
05.04.06	ARENADO DE SUPERFICIE CARPETEADA	M2	25 200.00	0.85	21 420.00	685 787.91	4 700 710.66
06	<u>SEÑALIZACIÓN Y SEGURIDAD VIAL</u>						
06.01	PINTURA DISCONTINUA EN PAVIMENTO	M2	25 200.00	22.73	572 796.00	572 796.00	572 796.00
07	<u>VARIOS</u>						
07.01	LIMPIEZA FINAL DE OBRA	M2	25 200.00	1.58	39 816.00	39 816.00	39 816.00
COSTO DIRECTO							7 420 324.50
GASTOS GENERALES					10 %	742 032.45	
UTILIDAD					8 %	593 625.96	
SUBTOTAL							8 755 982.92
IGV.					18 %	1 576 076.92	
PRESUPUESTO TOTAL							10 332 059.84

6.4. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN FRÍO CONVENCIONAL

Partida	01.01	CARTEL DE LA OBRA (3.60 X 8.50M - C/BANNER)				Rend.	1.0000 UND/DÍA
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
		Materiales					
	02 00018	CARTEL DE OBRA INC.INSTALACION Y TRANSPORTE	UND		1.0000	500.00	500.00
							500.00
						Costo unitario por UND :	500.00
Partida	02.01	MOVILIZACIÓN Y DESMOVILIZACIÓN DE EQUIPOS Y/O MAQUINARIA				Rend.	1.0000 GLB/DÍA
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
		Equipo					
	32 00343	MOVILIZACIÓN Y DESMOVILIZACIÓN DE EQUIPO	GLB		1.0000	5,000.00	5 000.00
							5 000.00
						Costo unitario por GLB :	5 000.00
Partida	02.02	TRAZO, NIVELACIÓN Y REPLANTEO PRELIMINAR				Rend.	1 000.0000 M2/DÍA
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
		Mano de Obra					
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0008	22.42	0.02
	47 00086	TOPÓGRAFO	HH	2.000	0.0160	19.18	0.31
	47 00009	PEÓN	HH	1.000	0.0080	14.30	0.11
							0.44
		Materiales					
	02 00242	CLAVOS PARA MADERA C/C 1 1/2 "	KG		0.0200	4.24	0.08
	30 00020	MADERA TORNILLO	P2		0.0600	7.00	0.42
	30 06860	PINTURA ESMALTE	gal		0.0050	45.00	0.23
	30 03568	YESO (BOLSA DE 28 Kg)	BOL		0.0200	25.42	0.51

							1.24
		Equipo					
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.44	0.01
	48 06864	ESTACIÓN TOTAL	hm	1.000	0.0080	14.88	0.12
							0.13
						Costo unitario por M2 :	1.81
Partida	02.03	TRAZO NIVELACIÓN Y REPLANTEO DURANTE LA OBRA				Rend.	4000 M2/DÍA
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
		Mano de Obra					
	47 00086	TOPÓGRAFO	HH	1.000	0.0020	19.18	0.04
	47 00009	PEÓN	HH	2.000	0.0040	14.30	0.06
							0.10
		Materiales					
	30 03568	YESO (BOLSA DE 28 Kg)	BOL		0.0500	25.42	1.27
							1.27
		Equipo					
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.10	0.29
	48 06864	ESTACIÓN TOTAL	hm	1.000	0.0020	14.88	0.03
							0.32
						Costo unitario por M2 :	1.68
Partida	03.01	RIEGO DE VÍA CON TANQUE CISTERNA				Rend.	2 000.0000 M2/DÍA
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
		Mano de Obra					
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0004	22.42	0.01
	47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0040	19.18	0.08
	47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0040	15.90	0.06
							0.15
		Materiales					
	05 00002	AGUA	M3		0.0100	5.00	0.05
							0.05
		Equipo					
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.15	-
	48 04397	CAMIÓN CISTERNA 4x2(AGUA)178-210HP 3000G	HM	1.000	0.0040	127.12	0.51
							0.51
						Costo unitario por M2 :	0.71
Partida	03.02	PROGRAMA Y MANEJO DE MONITOREO AMBIENTAL				Rend.	1.0000 GLB/DÍA
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
		Materiales					
	30 07000	TACHOS PLÁSTICOS DE BASURA	PZA		4.0000	95.00	380.00
	30 07001	TACHOS PLÁSTICOS PARA DEPÓSITOS DE COMBUSTIBLE	PZA		4.0000	95.00	380.00
	30 07002	TACHOS PLÁSTICOS PARA DEPÓSITOS DE LUBRICANTES Y OTROS	PZA		2.0000	95.00	190.00
							950.00
						Costo unitario por GLB :	950.00
Partida	04.01	DESBROCE Y LIMPIEZA DE TERRENO				Rend.	1 500.00 M2/DÍA
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
		Mano de Obra					
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0005	22.42	0.01

47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0053	19.18	0.10
47 00009	PEÓN	HH	4.000	0.0213	14.30	0.30
0.41						
Equipo						
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.41	0.02
48 00364	TRACTOR DE ORUGAS DE 140-160 HP	HM	1.000	0.0053	164.09	0.87
0.89						
Costo unitario por M2 :						1.30

Partida	04.02	CORTE MASIVO DE TERRENO A MÁQUINA					Rend.	170.0000 M3/DÍA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial		
Mano de Obra								
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0047	22.42	0.11		
47 00007	OPERARIO	HH	2.000	0.0941	19.18	1.80		
47 00009	PEÓN	HH	2.000	0.0941	14.30	1.35		
3.26								
Equipo								
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	3.26	0.10		
48 06874	CAMIÓN VOLQUETE DE 10 m3	hm	1.000	0.0471	120.00	5.65		
48 00385	CARGADOR S/LLANTAS 110 - 125 HP	HM	1.000	0.0471	148.31	6.99		
12.74								
Costo unitario por M3 :						16.00		

Partida	04.03	NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN DE SUBRASANTE					Rend.	300.0000 M2/DÍA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial		
Mano de Obra								
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0027	22.42	0.06		
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0267	19.18	0.51		
47 00008	OFICIAL	HH	2.000	0.0533	15.90	0.85		
47 00009	PEÓN	HH	2.000	0.0533	14.30	0.76		
2.18								
Materiales								
05 00002	AGUA	M3		0.0500	5.00	0.25		
0.25								
Equipo								
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	2.18	0.11		
48 04397	CAMIÓN CISTERNA 4x2(AGUA)178-210HP 3000G	HM	1.000	0.0267	127.12	3.39		
48 00366	RODILLO LISO VIBR AUTOP 101-135HP 10-12T	HM	1.000	0.0267	150.00	4.01		
7.51								
Costo unitario por M2 :						9.94		

Partida	04.04	ELIMINACIÓN DE MATERIAL EXCEDENTE					Rend.	312.0000 M3/DÍA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial		
Mano de Obra								
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0026	22.42	0.06		
47 00009	PEÓN	HH	2.000	0.0513	14.30	0.73		
0.79								
Equipo								
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.79	0.02		
48 06874	CAMIÓN VOLQUETE DE 10 m3	hm	3.000	0.0769	120.00	9.23		
48 00385	CARGADOR S/LLANTAS 110 - 125 HP	HM	1.000	0.0256	148.31	3.80		

							13.05
							Costo unitario por M3 :
							13.84
Partida	05.01.01	CARGUÍO DE MATERIAL PARA SUB BASE				Rend.	300.0000 M3/DÍA
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0027	22.42	0.06	
							0.06
Materiales							
30 00132	MATERIAL CLASIFICADO GRANULAR	M3		0.2400	45.00	10.80	
							10.80
Equipo							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.06	0.18	
48 00385	CARGADOR S/LLANTAS 110 - 125 HP	HM	1.000	0.0267	148.31	3.96	
							4.14
							Costo unitario por M3 :
							15.00
Partida	05.01.02	TRANSPORTE DM=60.00 KM				Rend.	35.0000 M3/DÍA
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0229	22.42	0.51	
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.2286	19.18	4.38	
47 00008	OFICIAL	HH	0.500	0.1143	15.90	1.82	
							6.71
Equipo							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	6.71	20.14	
48 06874	CAMIÓN VOLQUETE DE 10 m3	hm	1.000	0.2286	120.00	27.43	
							47.57
							Costo unitario por M3 :
							54.28
Partida	05.01.03	REFINE Y COMPACTACIÓN DE SUBRASANTE				Rend.	1 250.0000 M2/DÍA
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0006	22.42	0.01	
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0064	19.18	0.12	
47 00008	OFICIAL	HH	3.000	0.0192	15.90	0.31	
47 00009	PEÓN	HH	3.000	0.0192	14.30	0.27	
							0.71
Materiales							
05 00002	AGUA	M3		0.0300	5.00	0.15	
30 00132	PETRÓLEO DIESEL # 2	GLN		0.0080	11.44	0.09	
							0.24
Equipo							
48 04397	CAMIÓN CISTERNA 4x2(AGUA)178-210HP 3000G	HM	1.000	0.0064	127.12	0.81	
48 00351	MOTONIVELADORA DE 125 HP	HM	1.000	0.0064	152.54	0.98	
48 00366	RODILLO LISO VIBR. AUTOP 101-135HP 10-12T	HM	1.000	0.0064	150.00	0.96	
							2.75
							Costo unitario por M2 :
							3.70
Partida	05.01.04	EXTENDIDO Y COMPACTACIÓN DE SUBBASE				Rend.	120.0000 m2/DÍA
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	

Mano de Obra								
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0067	22.42	0.15		
47 00007	OPERARIO	HH	3.000	0.2000	19.18	3.84		
47 00008	OFICIAL	HH	2.000	0.1333	15.90	2.12		
47 00009	PEÓN	HH	8.000	0.5333	14.30	7.63		
							13.74	
Equipo								
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	13.74	0.69		
48 04397	CAMIÓN CISTERNA 4x2(AGUA)178-210HP 3000G	HM	1.000	0.0667	127.12	8.48		
48 06878	COMPACTADORA VIBRATORIA TIPO PLANCHA 7 HP	hm	0.500	0.0333	12.70	0.42		
48 00351	MOTONIVELADORA DE 125 HP	HM	1.000	0.0667	152.54	10.17		
48 00366	RODILLO LISO VIBR AUTOP 101-135HP 10-12T	HM	1.000	0.0667	150.00	10.01		
							29.77	
Costo unitario por m2 :							43.51	

Partida	05.02.01	CARGUÍO DE MATERIAL PARA BASE				Rend.	300.0000 M3/DÍA
	Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra							
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0027	22.42	0.06
							0.06
Materiales							
	29 00132	PIEDRA CHANCADA T.M.1"	M3		0.0800	30.00	2.40
	30 00132	MATERIAL CLASIFICADO GRANULAR	M3		0.2400	55.00	13.20
							15.60
Equipo							
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.06	0.18
	48 00385	CARGADOR S/LLANTAS 110 - 125 HP	HM	1.000	0.0267	148.31	3.96
							4.14
Costo unitario por M3 :							19.80

Partida	05.02.02	TRANSPORTE DM=60.00 KM				Rend.	35.0000 M3/DÍA
	Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra							
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0229	22.42	0.51
	47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.2286	19.18	4.38
	47 00008	OFICIAL	HH	0.500	0.1143	15.90	1.82
							6.71
Equipo							
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	6.71	20.14
	48 06874	CAMIÓN VOLQUETE DE 10 m3	hm	1.000	0.2286	120.00	27.43
							47.57
Costo unitario por M3 :							54.28

Partida	05.02.03	EXTENDIDO Y COMPACTACIÓN DE BASE GRANULAR				Rend.	120.0000 m2/DÍA
	Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
Mano de Obra							
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0067	22.42	0.15
	47 00007	OPERARIO	HH	3.000	0.2000	19.18	3.84
	47 00008	OFICIAL	HH	2.000	0.1333	15.90	2.12
	47 00009	PEÓN	HH	8.000	0.5333	14.30	7.63
							13.74

Equipo						
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	13.74	0.69
48 04397	CAMIÓN CISTERNA 4x2(AGUA)178-210HP 3000G	HM	1.000	0.0667	127.12	8.48
48 06878	COMPACTADORA VIBRATORIA TIPO PLANCHA 7 HP	hm	0.500	0.0333	12.70	0.42
48 00351	MOTONIVELADORA DE 125 HP	HM	1.000	0.0667	152.54	10.17
48 00366	RODILLO LISO VIBR AUTOP 101-135HP 10-12T	HM	1.000	0.0667	150.00	10.01
						29.77
						Costo unitario por m2 :
						43.51

Partida	05.03.01	IMPRIMACIÓN ASFÁLTICA				Rend.	1 000.0000 M2/DÍA
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0008	22.42	0.02	
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0080	19.18	0.15	
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0080	15.90	0.13	
47 00009	PEÓN	HH	8.000	0.0640	14.30	0.92	
						1.22	
Materiales							
05 00029	ARENA GRUESA	M3		0.0040	42.28	0.17	
13 07003	ASFALTO DILUIDO MC-30	GLN		0.2300	14.14	3.25	
						3.42	
Equipo							
48 03184	CAMIÓN IMPRIMADOR DE 1800 GLS.	HM	1.000	0.0080	101.69	0.81	
48 00346	COMPRESORA NEUMATICA 76 HP 125-175 PCM	HM	1.000	0.0080	38.14	0.31	
						1.12	
						Costo unitario por M2 :	5.76

Partida	05.03.02	ARENADO DE SUPERFICIE IMPRIMADA				Rend.	1 300.0000 m2/DÍA
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.500	0.0031	22.42	0.07	
47 00009	PEÓN	HH	6.000	0.0369	14.30	0.53	
						0.60	
Materiales							
05 00033	ARENA FINA	M3		0.0195	38.05	0.74	
						0.74	
Equipo							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.60	0.03	
						0.03	
						Costo unitario por m2 :	1.37

Partida	05.03.03	BARRIDO DE SUPERFICIE IMPRIMADA				Rend.	200.0000 M2/DÍA
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0040	22.42	0.09	
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0400	15.90	0.64	
47 00009	PEÓN	HH	6.000	0.2400	14.30	3.43	
						4.16	
Materiales							
37 06828	ESCOBA	UND	5.000	0.0025	5.51	0.01	
						0.01	

	Equipo						
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	4.16		0.12
48 00346	COMPRESORA NEUMATICA 76 HP 125-175 PCM	HM	1.000	0.0400	38.14		1.53
							1.65
					Costo unitario por M2 :		5.82

Partida	05.04.01	PREPARACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO					Rend.	2 000.0000 M2/DÍA
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
		Mano de Obra						
	47 00006	CAPATAZ	HH	1.000	0.0040	22.42	0.09	
	47 00008	OFICIAL	HH	2.000	0.0080	15.90	0.13	
	47 00009	PEÓN	HH	4.000	0.0160	14.30	0.23	
							0.45	
		Materiales						
	05 06829	ARENA PARA MEZCLA ASFÁLTICA	M3		0.0200	42.28	0.85	
	05 00099	PIEDRA CHANCADA DE 1/2"	M3		0.0300	50.76	1.52	
	13 00666	ASFALTO RC-250	GLN		1.3000	12.78	16.61	
							18.98	
		Equipo						
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.45	0.01	
	48 00385	CARGADOR S/LLANTAS 110 - 125 HP	HM	1.000	0.0040	148.31	0.59	
							0.60	
					Costo unitario por M2 :		20.03	

Partida	05.04.02	CARGUÍO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO					Rend.	600.0000 M3/DÍA
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
		Mano de Obra						
	47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0133	19.18	0.26	
	47 00008	OFICIAL	HH	0.500	0.0067	15.90	0.11	
							0.37	
		Equipo						
	48 00385	CARGADOR S/LLANTAS 110 - 125 HP	HM	1.000	0.0133	148.31	1.97	
							1.97	
					Costo unitario por M3 :		2.34	

Partida	05.04.03	TRANSPORTE DE MEZCLA ASFÁLTICA A OBRA					Rend.	740.0000 M3/DÍA
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
		Mano de Obra						
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0011	22.42	0.02	
	47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0108	15.90	0.17	
							0.19	
		Equipo						
	48 06874	CAMIÓN VOLQUETE DE 10 m3	hm	3.000	0.0324	120.00	3.89	
							3.89	
					Costo unitario por M3 :		4.08	

Partida	05.04.04	RIEGO DE LIGA CON LÍQUIDO ASFÁLTICO					Rend.	1 500.0000 M2/DÍA
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
		Mano de Obra						
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.500	0.0027	22.42	0.06	
	47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0053	19.18	0.10	

47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0053	15.90	0.08
47 00009	PEÓN	HH	4.000	0.0213	14.30	0.30
0.54						
Materiales						
13 00666	ASFALTO RC-250	GLN		0.0750	12.78	0.96
0.96						
Equipo						
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.54	0.03
48 03183	BARREDORA MECÁNICA	HM	1.000	0.0053	76.27	0.40
48 03184	CAMIÓN IMPRIMADOR DE 1800 GLS.	HM	1.000	0.0053	101.69	0.54
48 00366	RODILLO LISO VIBR AUTOP 101-135HP 10-12T	HM	1.000	0.0053	150.00	0.80
1.77						
Costo unitario por M2 :						3.27

Partida	05.04.05	EXTENDIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO					Rend.	2 500.0000 M2/DÍA
	Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra								
	47 00006	CAPATAZ	HH	1.000	0.0032	22.42	0.07	
	47 00007	OPERARIO	HH	4.000	0.0128	19.18	0.25	
	47 00008	OFICIAL	HH	6.000	0.0192	15.90	0.31	
	47 00009	PEÓN	HH	6.000	0.0192	14.30	0.27	
0.90								
Equipo								
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.90	0.03	
	48 06833	PAVIMENTADORA SOBRE ORUGA 69 HP	HM	1.000	0.0032	182.20	0.58	
	48 06832	RODILLO NEUMÁTICO AUTOP. 135 HP 9-26 TON	HM	1.000	0.0032	122.89	0.39	
	48 05739	RODILLO TANDEM VIB.AUTOP 111-130HP 9-11T	HM	1.000	0.0032	135.60	0.43	
1.43								
Costo unitario por M2 :						2.33		

Partida	05.04.06	ARENADO DE SUPERFICIE CARPETEADA					Rend.	1 200.0000 M2/DÍA
	Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra								
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.500	0.0033	22.42	0.07	
	47 00009	PEÓN	HH	4.000	0.0267	14.30	0.38	
0.45								
Materiales								
	05 00033	ARENA FINA	M3		0.0100	38.05	0.38	
0.38								
Equipo								
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.45	0.02	
0.02								
Costo unitario por M2 :						0.85		

Partida	06.01	PINTURA DISCONTINUA EN PAVIMENTO					Rend.	150.0000 M2/DÍA
	Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra								
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.200	0.0107	22.42	0.24	
	47 00007	OPERARIO	HH	2.000	0.1067	19.18	2.05	
	47 00009	PEÓN	HH	4.000	0.2133	14.30	3.05	
5.34								

Materiales						
30 03189	MICROESFERAS DE VIDRIO	KG		0.3000	30.00	9.00
30 06841	SOLVENTE PARA PINTURA DE TRÁFICO	GLN		0.0150	31.60	0.47
54 04501	PINTURA DE TRAFICO	GLN		0.0850	63.60	5.41
						14.88
Equipo						
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	5.34	0.16
48 06843	MÁQUINA PARA PINTAR	HM	1.000	0.0533	44.07	2.35
						2.51
Costo unitario por M2 :						22.73

Partida	07.01	LIMPIEZA FINAL DE OBRA				Rend.	150.0000 M2/DÍA
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
Mano de Obra							
47 00009	PEÓN	HH	2.000	0.1067	14.30	1.53	
						1.53	
Equipo							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	1.53	0.05	
						0.05	
Costo unitario por M2 :						1.58	

6.5. DATOS DE ENTRADA PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTÉTICA MÉTODO AASHTO 93

El diseño de nuestro pavimento es el mismo método del ítem 6.2 y los mismos parámetros con la diferencia en la base ya que es un base estabilizada con cemento y zeolita sintética; para ellos, tomamos en cuenta los siguientes valores referenciales.

W 18	2,1 x 10 ⁶
Δ PSI	2,2
So	0,49
Zr	1,282
CBR S. FUNDACIÓN	2.20%
CBR BASE	100% a +
MR BASE	3300
MR PAVIMENTO	48684.52
a1	0.44
a2	0.16
mi	0.80

$$SN = SN1 + SN2 + SN3$$

$$SN = a1 D1 + a2 mi D2 + a3 mi D3$$

$$SN1 = a1 D1$$

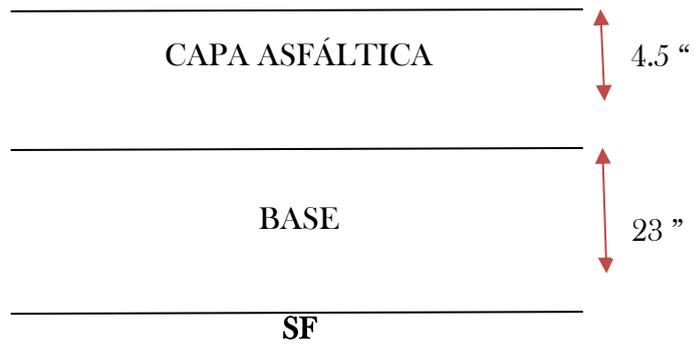
$$D1 = \frac{1.9266}{0.44} = 4.37 = 4.5 \text{ pulg}$$

$$SN1^* = a1 D1^*$$

$$SN1^* = 1.98 \text{ pulg}$$

$$SN2 = 4.9260$$

$$D2 = \frac{(SN2 - SN1^*)}{a2 .mi} = 23 \text{ pulg}$$



6.6. PRESUPUESTO DEL DISEÑO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO EN SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTÉTICA

Presupuesto

PAVIMENTACIÓN DE UNA VÍA DE 3 500 M DE LONGITUD Y 7.20 M DE ANCHO EN UN SUELO ARCILLOSO, PAVIMENTO FLEXIBLE EN FRÍO. TOMAMOS EN CUENTA QUE LA OBRA SE ENCUENTRA A UNA DM DE 60 KM DE UNA CANTERA

AREQUIPA - AREQUIPA

Ítem	Descripción	Unidad	Metrado	Precio	Parcial	Subtotal	Total
01	<u>OBRAS PROVISIONALES</u>						
01.01	CARTEL DE LA OBRA (3.60 X 8.50M - C/BANNER)	UND	1.00	500.00	500.00	500.00	500.00
02	<u>TRABAJOS PRELIMINARES</u>						
02.01	MOVILIZACIÓN Y DESMOVILIZACIÓN DE EQUIPOS Y/O MAQUINARIA	GLB	1.00	5,000.00	5,000.00		
02.02	TRAZO, NIVELACIÓN Y REPLANTEO PRELIMINAR	M2	25 200.00	1.81	45 612.00		
02.03	TRAZO NIVELACIÓN Y REPLANTEO DURANTE LA OBRA	M2	25, 00.00	1.68	42 411.60	93 023.60	93 023.60
03	<u>MITIGACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL</u>						
03.01	RIEGO DE VÍA CON TANQUE CISTERNA	M2	25 200.00	0.77	19 404.00		
03.02	PROGRAMA Y MANEJO DE MONITOREO AMBIENTAL	GLB	1.00	950.00	950.00	20 354.00	20 354.00
04	<u>MOVIMIENTO DE TIERRAS</u>						
04.01	DESBROCE Y LIMPIEZA DE TERRENO	M2	25 200.00	1.30	32 760.00		
04.02	NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN DE SUBRASANTE	M3	25 200.00	16.00	403 200.00		
04.04	ELIMINACIÓN DE MATERIAL EXCEDENTE	M3	36 036.00	13.84	498 738.24	934 698.24	934 698.24
05	<u>PAVIMENTOS</u>						
05.01	<u>BASE</u>						
05.01.01	MEZCLADO, HOMOGENIZADO Y EXTENDIO DE BASE PARA PAVIMENTO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTÉTICA	M3	14 616.00	230.96	3 375 689.79		
05.01.03	COMPACTACIÓN DE BASE ESTABILIZADA CON Cº Y Z.S	M2	25 200.00	37.02	932 959.49		
05.01.04	CURADO DE LA SUPERFICIE ESTABILIZADA CON Cº Y Z.S	m2	25 200.00	1.05	26 343.07	4 334 992.35	
05.02	<u>IMPRIMACIÓN</u>						
05.02.01	IMPRIMACIÓN ASFÁLTICA	M2	25 200.00	5.76	145 152.00		
05.03.02	ARENADO DE SUPERFICIE IMPRIMADA	m2	25 200.00	1.37	34 524.00		
05.03.03	BARRIDO DE SUPERFICIE IMPRIMADA	M2	25 200.00	5.82	146 664.00	326 340.00	
05.03	<u>CARPETA ASFÁLTICA EN FRÍO E=4.5"</u>						
05.03.01	PREPARACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO	M2	25 200.00	20.03	504 756.00		
05.03.02	CARGUÍO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO	M3	2 772.00	2.34	6 486.48		
05.03.03	TRANSPORTE DE MEZCLA ASFÁLTICA A OBRA	M3	2 772.00	4.08	11 309.76		
05.03.04	RIEGO DE LIGA CON LÍQUIDO ASFÁLTICO	M2	25 200.00	3.27	82 404.00		
05.03.05	EXTENDIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO	M2	25 200.00	2.33	58 716.00		
05.03.06	ARENADO DE SUPERFICIE CARPETEADA	M2	25 200.00	0.85	21 420.00	685 092.24	5 346 424.59
06	<u>SEÑALIZACIÓN Y SEGURIDAD VIAL</u>						
06.01	PINTURA DISCONTINUA EN PAVIMENTO	M2	25 200.00	22.73	572 796.00	572 796.00	572 796.00
07	<u>VARIOS</u>						
07.01	LIMPIEZA FINAL DE OBRA	M2	25 200.00	1.58	39 816.00	39 816.00	39 816.00

COSTO DIRECTO		7 007 612.43
GASTOS GENERALES	10 %	700 761.24
UTILIDAD	8 %	560 608.99
SUBTOTAL		8 268 982.67
IGV.	18 %	1 488 416.88
PRESUPUESTO TOTAL		9 757 399.55

6.7. ANÁLISIS DE PRECIOS UNITARIOS DEL PAVIMENTO ASFÁLTICO EN SUELO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTÉTICA

Partida	Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial
01.01		CARTEL DE LA OBRA (3.60 X 8.50M - C/BANNER)				Rend. 1.0000	UND/DÍA
	02 00018	Materiales CARTEL DE OBRA INC.INSTALACION Y TRANSPORTE	UND		1.0000	500.00	500.00
						Costo unitario por UND :	500.00
02.01		MOVILIZACIÓN Y DESMOVILIZACIÓN DE EQUIPOS Y/O MAQUINARIA				Rend. 1.0000	GLB/DÍA
	32 00343	Equipo MOVILIZACIÓN Y DESMOVILIZACIÓN DE EQUIPO	GLB		1.0000	5,000.00	5 000.00
						Costo unitario por GLB :	5 000.00
02.02		TRAZO, NIVELACIÓN Y REPLANTEO PRELIMINAR				Rend. 1 000.0000	M2/DÍA
		Mano de Obra					
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0008	22.42	0.02
	47 00086	TOPÓGRAFO	HH	2.000	0.0160	19.18	0.31
	47 00009	PEÓN	HH	1.000	0.0080	14.30	0.11
							0.44
		Materiales					
	02 00242	CLAVOS PARA MADERA C/C 1 1/2 "	KG		0.0200	4.24	0.08
	30 00020	MADERA TORNILLO	P2		0.0600	7.00	0.42
	30 06860	PINTURA ESMALTE	gal		0.0050	45.00	0.23
	30 03568	YESO (BOLSA DE 28 Kg)	BOL		0.0200	25.42	0.51
							1.24
		Equipo					
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.44	0.01
	48 06864	ESTACIÓN TOTAL	hm	1.000	0.0080	14.88	0.12
							0.13
						Costo unitario por M2 :	1.81
02.03		TRAZO NIVELACIÓN Y REPLANTEO DURANTE LA OBRA				Rend. 4000	M2/DÍA

Mano de Obra							
47 00086	TOPÓGRAFO	HH	1.000	0.0020	19.18		0.04
47 00009	PEÓN	HH	2.000	0.0040	14.30		0.06
							0.10
Materiales							
30 03568	YESO (BOLSA DE 28 Kg)	BOL		0.0500	25.42		1.27
							1.27
Equipo							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.10		0.29
48 06864	ESTACIÓN TOTAL	hm	1.000	0.0020	14.88		0.03
							0.32
Costo unitario por M2 :							1.68

Partida	03.01	RIEGO DE VÍA CON TANQUE CISTERNA					Rend.	2 000.0000 M2/DÍA
	Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra								
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0004	22.42	0.01	
	47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0040	19.18	0.08	
	47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0040	15.90	0.06	
							0.15	
Materiales								
	05 00002	AGUA	M3		0.0100	5.00	0.05	
							0.05	
Equipo								
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.15	-	
	48 04397	CAMIÓN CISTERNA 4x2(AGUA)178-210HP 3000G	HM	1.000	0.0040	127.12	0.51	
							0.51	
Costo unitario por M2 :							0.71	

Partida	03.02	PROGRAMA Y MANEJO DE MONITOREO AMBIENTAL					Rend.	1.0000 GLB/DÍA
	Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Materiales								
	30 07000	TACHOS PLÁSTICOS DE BASURA	PZA		4.0000	95.00	380.00	
	30 07001	TACHOS PLÁSTICOS PARA DEPÓSITOS DE COMBUSTIBLE	PZA		4.0000	95.00	380.00	
	30 07002	TACHOS PLÁSTICOS PARA DEPÓSITOS DE LUBRICANTES Y OTROS	PZA		2.0000	95.00	190.00	
							950.00	
Costo unitario por GLB :							950.00	

Partida	04.01	DESBROCE Y LIMPIEZA DE TERRENO					Rend.	1 500.00 M2/DÍA
	Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra								
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0005	22.42	0.01	
	47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0053	19.18	0.10	
	47 00009	PEÓN	HH	4.000	0.0213	14.30	0.30	
							0.41	
Equipo								
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.41	0.02	
	48 00364	TRACTOR DE ORUGAS DE 140-160 HP	HM	1.000	0.0053	164.09	0.87	
							0.89	
Costo unitario por M2 :							1.30	

Partida	04.02	NIVELACIÓN Y COMPACTACIÓN DE SUBRASANTE				Rend.	170.0000 M3/DÍA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0047	22.42	0.11	
47 00007	OPERARIO	HH	2.000	0.0941	19.18	1.80	
47 00009	PEÓN	HH	2.000	0.0941	14.30	1.35	
						3.26	
Equipo							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	3.26	0.10	
48 06874	CAMION VOLQUETE DE 10 m3	hm	1.000	0.0471	120.00	5.65	
48 00385	CARGADOR S/LLANTAS 110 - 125 HP	HM	1.000	0.0471	148.31	6.99	
						12.74	
Costo unitario por M3 :						16.00	

Partida	04.04	ELIMINACIÓN DE MATERIAL EXCEDENTE				Rend.	312.0000 M3/DÍA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0026	22.42	0.06	
47 00009	PEÓN	HH	2.000	0.0513	14.30	0.73	
						0.79	
Equipo							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.79	0.02	
48 06874	CAMIÓN VOLQUETE DE 10 m3	hm	3.000	0.0769	120.00	9.23	
48 00385	CARGADOR S/LLANTAS 110 - 125 HP	HM	1.000	0.0256	148.31	3.80	
						13.05	
Costo unitario por M3 :						13.84	

Partida	05.01.01	MEZCLADO, HOMOGENIZADO Y EXTENDIDO DE BASE PARA PAVIMENTO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTÉTICA				Rend.	250 m3/DÍA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.00320	22.42	0.07	
47 00009	PEÓN	HH	4.000	0.12800	14.30	1.83	
						1.90	
Materiales							
29 00132	CEMENTO PORTLAND IP	BOL		4.0000	17.20	68.80	
30 00132	ZEOLITA SINTÉTICA	KG		1.6560	86.40	143.08	
31 00132	AGUA	M3		0.3463	5.00	1.73	
						213.61	
Equipo							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.18	0.01	
48 00351	MOTONIVELADORA DE 125 HP	HM	1.000	0.03200	152.54	4.88	
48 04397	CAMIÓN CISTERNA 4x2(AGUA)178-210HP 3000G	HM	1.000	0.03200	30.00	0.96	
48 00385	Recuperador de caminos CAT, RM-300 de 350 hp de potencia, 8 ft. ancho	HM	1.000	0.03200	300.00	9.60	
						15.45	
Costo unitario por M3 :						230.96	

Partida	05.01.03	COMPACTACIÓN DE BASE ESTABILIZADA CON Cº Y Z.S				Rend.	120.0000 m2/DÍA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0067	22.42	0.15	
47 00007	OPERARIO	HH	3.000	0.2000	19.18	3.84	

47 00008	OFICIAL	HH	2.000	0.1333	15.90	2.12
47 00009	PEÓN	HH	8.000	0.5333	14.30	7.63
						13.73
Equipo						
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO	5.0000		13.74	0.69
48 04397	CAMIÓN CISTERNA 4x2(AGUA)178-210HP 3000G	HM	1.000	0.0667	30.00	2.00
48 06878	COMPACTADORA VIBRATORIA TIPO PLANCHA 7 HP	hm	0.500	0.0333	12.70	0.42
48 00351	MOTONIVELADORA DE 125 HP	HM	1.000	0.0667	152.54	10.17
48 00366	RODILLO LISO VIBR AUTOP 101-135HP 10-12T	HM	1.000	0.0667	150.00	10.01
						23.29
Costo unitario por m2 :						37.02

Partida	05.01.04	CURADO DE LA SUPERFICIE ESTABILIZADA CON C° Y Z.S				Rend.	4500.0000 m2/DÍA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra							
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0018	15.90	0.03	
47 00009	PEÓN	HH	1.000	0.0018	14.30	0.03	
						0.05	
Materiales							
31 00132	AGUA	M3		0.0500	5.00	0.25	
						0.25	
Equipo							
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	13.74	0.69	
48 04397	CAMIÓN CISTERNA 4x2(AGUA)178-210HP 3000G	HM	1.000	0.0018	30.00	0.05	
						0.74	
Costo unitario por m2 :						1.05	

Partida	05.02.01	IMPRIMACIÓN ASFÁLTICA				Rend.	1 000.0000 M2/DÍA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0008	22.42	0.02	
47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0080	19.18	0.15	
47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0080	15.90	0.13	
47 00009	PEÓN	HH	8.000	0.0640	14.30	0.92	
						1.22	
Materiales							
05 00029	ARENA GRUESA	M3		0.0040	42.28	0.17	
13 07003	ASFALTO DILUIDO MC-30	GLN		0.2300	14.14	3.25	
						3.42	
Equipo							
48 03184	CAMIÓN IMPRIMADOR DE 1800 GLS.	HM	1.000	0.0080	101.69	0.81	
48 00346	COMPRESORA NEUMATICA 76 HP 125-175 PCM	HM	1.000	0.0080	38.14	0.31	
						1.12	
Costo unitario por M2 :						5.76	

Partida	05.03.02	ARENADO DE SUPERFICIE IMPRIMADA				Rend.	1 300.0000 m2/DÍA
Código	Descripción Insumo	Unidad	Cuadrilla	Cantidad	Precio	Parcial	
Mano de Obra							
47 00006	CAPATAZ	HH	0.500	0.0031	22.42	0.07	
47 00009	PEÓN	HH	6.000	0.0369	14.30	0.53	
						0.60	

		Materiales					
05 00033	ARENA FINA		M3	0.0195	38.05	0.74	
						0.74	
		Equipo					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES		%MO	5.0000	0.60	0.03	
						0.03	
					Costo unitario por m2 :	1.37	
Partida	05.03.03	BARRIDO DE SUPERFICIE IMPRIMADA			Rend.	200.0000 M2/DÍA	
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
		Mano de Obra					
47 00006	CAPATAZ		HH	0.100	0.0040	22.42	0.09
47 00008	OFICIAL		HH	1.000	0.0400	15.90	0.64
47 00009	PEÓN		HH	6.000	0.2400	14.30	3.43
							4.16
		Materiales					
37 06828	ESCOBA		UND	5.000	0.0025	5.51	0.01
							0.01
		Equipo					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES		%MO	3.0000	4.16	0.12	
48 00346	COMPRESORA NEUMATICA 76 HP 125-175 PCM		HM	1.000	0.0400	38.14	1.53
							1.65
					Costo unitario por M2 :	5.82	
Partida	05.03.01	PREPARACIÓN DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO			Rend.	2 000.0000 M2/DÍA	
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
		Mano de Obra					
47 00006	CAPATAZ		HH	1.000	0.0040	22.42	0.09
47 00008	OFICIAL		HH	2.000	0.0080	15.90	0.13
47 00009	PEÓN		HH	4.000	0.0160	14.30	0.23
							0.45
		Materiales					
05 06829	ARENA PARA MEZCLA ASFÁLTICA		M3		0.0200	42.28	0.85
05 00099	PIEDRA CHANCADA DE 1/2"		M3		0.0300	50.76	1.52
13 00666	ASFALTO RC-250		GLN		1.3000	12.78	16.61
							18.98
		Equipo					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES		%MO	3.0000	0.45	0.01	
48 00385	CARGADOR S/LLANTAS 110 - 125 HP		HM	1.000	0.0040	148.31	0.59
							0.60
					Costo unitario por M2 :	20.03	
Partida	05.03.02	CARGUÍO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO			Rend.	600.0000 M3/DÍA	
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>
		Mano de Obra					
47 00007	OPERARIO		HH	1.000	0.0133	19.18	0.26
47 00008	OFICIAL		HH	0.500	0.0067	15.90	0.11
							0.37
		Equipo					
48 00385	CARGADOR S/LLANTAS 110 - 125 HP		HM	1.000	0.0133	148.31	1.97
							1.97

							Costo unitario por M3 :	2.34
Partida	05.03.03	TRANSPORTE DE MEZCLA ASFÁLTICA A OBRA				Rend.	740.0000 M3/DÍA	
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
	Mano de Obra							
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.100	0.0011	22.42	0.02	
	47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0108	15.90	0.17	
	<hr/>							
	0.19							
	Equipo							
	48 06874	CAMIÓN VOLQUETE DE 10 m3	hm	3.000	0.0324	120.00	3.89	
	<hr/>							
	3.89							
	<hr/>							
	Costo unitario por M3 :						4.08	
Partida	05.03.04	RIEGO DE LIGA CON LÍQUIDO ASFÁLTICO				Rend.	1 500.0000 M2/DÍA	
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
	Mano de Obra							
	47 00006	CAPATAZ	HH	0.500	0.0027	22.42	0.06	
	47 00007	OPERARIO	HH	1.000	0.0053	19.18	0.10	
	47 00008	OFICIAL	HH	1.000	0.0053	15.90	0.08	
	47 00009	PEÓN	HH	4.000	0.0213	14.30	0.30	
	<hr/>							
	0.54							
	Materiales							
	13 00666	ASFALTO RC-250	GLN		0.0750	12.78	0.96	
	<hr/>							
	0.96							
	Equipo							
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.54	0.03	
	48 03183	BARREDORA MECÁNICA	HM	1.000	0.0053	76.27	0.40	
	48 03184	CAMIÓN IMPRIMADOR DE 1800 GLS.	HM	1.000	0.0053	101.69	0.54	
	48 00366	RODILLO LISO VIBR AUTOP 101-135HP 10-12T	HM	1.000	0.0053	150.00	0.80	
	<hr/>							
	1.77							
	Costo unitario por M2 :						3.27	
Partida	05.03.05	EXTENDIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFÁLTICA EN FRÍO				Rend.	2 500.0000 M2/DÍA	
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
	Mano de Obra							
	47 00006	CAPATAZ	HH	1.000	0.0032	22.42	0.07	
	47 00007	OPERARIO	HH	4.000	0.0128	19.18	0.25	
	47 00008	OFICIAL	HH	6.000	0.0192	15.90	0.31	
	47 00009	PEÓN	HH	6.000	0.0192	14.30	0.27	
	<hr/>							
	0.90							
	Equipo							
	37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	0.90	0.03	
	48 06833	PAVIMENTADORA SOBRE ORUGA 69 HP	HM	1.000	0.0032	182.20	0.58	
	48 06832	RODILLO NEUMÁTICO AUTOP. 135 HP 9-26 TON	HM	1.000	0.0032	122.89	0.39	
	48 05739	RODILLO TANDEM VIB.AUTOP 111-130HP 9-11T	HM	1.000	0.0032	135.60	0.43	
	<hr/>							
	1.43							
	Costo unitario por M2 :						2.33	
Partida	05.03.06	ARENADO DE SUPERFICIE CARPETEADA				Rend.	1 200.0000 M2/DÍA	
	<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
	Mano de Obra							

47 00006	CAPATAZ	HH	0.500	0.0033	22.42	0.07
47 00009	PEÓN	HH	4.000	0.0267	14.30	0.38
						0.45
	Materiales					
05 00033	ARENA FINA	M3		0.0100	38.05	0.38
						0.38
	Equipo					
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		5.0000	0.45	0.02
						0.02
						Costo unitario por M2 : 0.85

Partida	06.01	PINTURA DISCONTINUA EN PAVIMENTO				Rend.	150.0000 M2/DÍA
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
	Mano de Obra						
47 00006	CAPATAZ	HH	0.200	0.0107	22.42	0.24	
47 00007	OPERARIO	HH	2.000	0.1067	19.18	2.05	
47 00009	PEÓN	HH	4.000	0.2133	14.30	3.05	
						5.34	
	Materiales						
30 03189	MICROESFERAS DE VIDRIO	KG		0.3000	30.00	9.00	
30 06841	SOLVENTE PARA PINTURA DE TRÁFICO	GLN		0.0150	31.60	0.47	
54 04501	PINTURA DE TRAFICO	GLN		0.0850	63.60	5.41	
						14.88	
	Equipo						
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	5.34	0.16	
48 06843	MÁQUINA PARA PINTAR	HM	1.000	0.0533	44.07	2.35	
						2.51	
						Costo unitario por M2 : 22.73	

Partida	07.01	LIMPIEZA FINAL DE OBRA				Rend.	150.0000 M2/DÍA
<i>Código</i>	<i>Descripción Insumo</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cuadrilla</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Precio</i>	<i>Parcial</i>	
	Mano de Obra						
47 00009	PEÓN	HH	2.000	0.1067	14.30	1.53	
						1.53	
	Equipo						
37 00004	HERRAMIENTAS MANUALES	%MO		3.0000	1.53	0.05	
						0.05	
						Costo unitario por M2 : 1.58	

CONCLUSIONES

PRIMERA: Estabilizamos el suelo arcilloso para utilizarlo como base de un pavimento flexible, con un 10 % de cemento Portland y 1% de zeolita sintética, con la siguiente dosificación por m3:

Zeolita sintética: 1.65 kg/m3

Cemento Portland IP: 165 kg/m3

Agua: OCH 19% (+2%)

SEGUNDA: Reducimos la contaminación ambiental en la construcción de pavimentos con la utilización de un suelo arcilloso *in situ* estabilizado con cemento portland y zeolita sintética como base de un pavimento flexible, minimizando así la contaminación producida por el movimiento de tierras de este material y la utilización de material granular de préstamo, ya que esta genera contaminación ambiental tanto en el lugar donde se realiza la vía como en la cantera donde este material ha sido extraído.

TERCERA: Se determinaron las propiedades físicas y mecánicas del suelo arcilloso natural (CH) A-7-5 a estabilizar.

Límites de Atterberg		Índice de plasticidad	Peso específico de los sólidos (Gs)	Humedad óptima (%)	Densidad máxima (g/cm3)	Expansión (%)	CBR al 100% MD	CBR al 95% MD
Limite liquido	Limite plástico							
82.47%	35.76%	46.65%	2.8%	21.60%	1.57	5.75%	2.35%	2.20%

CUARTA: Se definieron las propiedades físicas y mecánicas del suelo estabilizado con cemento Portland IP y zeolita sintética.

Límites de Atterberg		Índice de plasticidad	Humedad óptima (%)	Resistencia a la compresión a los 7 días (kg/cm2)	Resistencia a la compresión a los 28 días (kg/cm2)	Expansión (%)	CBR al 100% MD	CBR al 95% MD
Limite liquido	Limite plástico							
50.06%	46.14%	21.60%	19.01%	14.22	19.66	1.34%	74.15%	64.14%

QUINTA: Los resultados obtenidos en esta investigación sobre el empleo de materiales *in situ* como es un suelo arcilloso, tratados con cemento y zeolita sintética, para la construcción de base de un pavimento flexible de alta performance es posible mediante el empleo de aditivos nanotecnológicos que permiten superar limitaciones tradicionales de construcción.

Los aditivos alcalinos del tipo zeolitas sintéticas, permiten optimizar el proceso de hidratación del cemento, lo que posibilita alcanzar estructuras de cristalización muy competentes, que se traduce en capas tratadas de alta resistencia y adecuada flexibilidad, ya que no se basa más en la calidad del material original como es el suelo arcilloso, sino en la generación de una estructura de cementación más competente, capaz de contener y encapsular al material.

SEXTA: Se obtuvo un porcentaje óptimo de cemento y zeolitas sintéticas basándonos en la resistencia a la compresión que alcanzó el suelo estabilizado, siendo este de 14.22 kg/cm² a los 7 días de curado, se sabe que para un tráfico intenso de una vía se debe tener como mínimo una resistencia de 14 kg/cm² según el libro Ingeniería de Suelos en las Vías Terrestres de Rico Rodriguez y Hermilio del Castillo, 1997.

SÉPTIMA: Se ha utilizado el suelo arcilloso estabilizado con cemento y zeolita sintética en un diseño como base de un pavimento flexible obteniendo espesores menores de base utilizando esta nueva tecnología y logrando así utilizar el material *in situ*.

OCTAVA: Se observó el micro-fisuramiento que genera una estabilización del suelo arcilloso con solo cemento, debido a la fragua, este suele agravarse con el tiempo y se sabe que esto se reflejaría en las capas asfálticas superiores, por lo que no se puede hablar una estabilización con solo cemento y menos ser utilizado como base ya que afectaría este fisuramiento a la carpeta asfáltica; para superar esta dependiente carencia de esta tecnología, existen diversas opciones como es el uso de bajo contenido de cemento, por lo tanto, una limitada ganancia de resistencia de la capa.

Con el empleo de esta solución, es posible eliminar completamente el fisuramiento por contracción de fragua, siempre que los procesos sean correctamente desarrollados.

NOVENA: El costo total de un pavimento flexible convencional con base y subbase conformada por materiales de préstamo es de 10 332 059.84 nuevos soles y un pavimento flexible conformado con una base de suelo arcilloso estabilizado con cemento portland IP y zeolita sintética es de 9 757 399.55 nuevos soles; se aprecia que al utilizar esta nueva nanotecnología en la estabilización del suelo, el costo disminuyó en 643 960.04 nuevos soles para 3.5 KM de pavimentación, a un costo por km de 183 988.58 nuevos soles, por lo que se logró una reducción apreciable; este valor tiene que ser evaluado en cada uno de los casos de una obra ya que depende mucho de la ubicación de la obra y de las canteras cercanas a esta, cabe resaltar que en este trabajo se tomó en cuenta que la distancia de la obra hacia una cantera para la extracción de material de préstamo es de 60 km el costo de una pavimentación convencional aumentaría si la obra se realiza a una mayor distancia.

RECOMENDACIONES

PRIMERA: Se recomienda el uso de un suelo arcilloso estabilizado con zeolita sintética y cemento portland IP correctamente dosificado para una base de un pavimento flexible.

SEGUNDA: No se recomienda el uso de cemento portland como único estabilizador de una base con suelo arcilloso para pavimento flexible ya que como se observó en los testigos, este provocó un fisuramiento que con el paso del tiempo se fue incrementando lo que es completamente desfavorable en las capas asfálticas superiores.

TERCERA: Se recomienda que en campo se garantice la homogeneidad del suelo estabilizado, esto se ayuda con la utilización previa de zeolita sintética ya que se observó en el laboratorio que al mezclar el suelo con la zeolita sintética no se generaban los terrones que normalmente se ven en la mezcla de un suelo arcilloso con agua.

CUARTA: Como se trata de un aditivo nanotecnológico en concentraciones muy pequeñas 0.5%, 1%, 1.5% respecto a la dosificación de cemento se debe garantizar que estas partículas se distribuyan homogéneamente en el suelo para que surja el intercambio iónico y el efecto envolvente.

QUINTA: El mezclado debe realizarse siempre en el mismo orden: primero el suelo con la zeolita sintética, luego el cemento portland y finalmente el agua. Al variar el orden las propiedades varían y no se logra una adecuada estabilización.

SEXTA: El mezclado de suelo y zeolita sintética, se recomienda que sea previo al mezclado con cemento, este tiempo de reposo dependerá de su clasificación del suelo SUCS, en nuestro caso por ser un suelo arcilloso se dio 24 horas.

SÉPTIMA: La zeolita sintética debe aplicarse de manera uniforme, en seco, evitando la volatilización, el 100% del aditivo de acuerdo a la dosificación.

OCTAVA: Se debe contar con el valor de humedad del suelo para poder determinar una masa seca, ya que la cantidad de Zeolitas Sintéticas y de Cemento Portland IP se calculan con respecto a la masa seca del suelo natural.

NOVENA: La adición de cemento Portland y el agua, debe ser justo antes de que se vaya a compactar la capa base, y se debe garantizar el curado de esta capa.

BIBLIOGRAFÍA

- Ing. Eithel Xavier Murillo V. (2010). Tesis Proyecto de Investigación “Estudio del comportamiento de las bases de pavimentos rígidos en la ciudad de Cuenca y su influencia en el diseño.” Tesis de Maestría en geología aplicada y geotecnia, Universidad de Cuenca, Ecuador. Disponible en: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/bitstream/123456789/2580/1/tm4332.pdf>.
- Pedro Antonio Serigos (2009). Tesis Proyecto de Investigación “Rigidez a baja deformación de mezclas de suelo de la formación pampeano y cemento portland” .Tesis de Pregrado, Universidad de Buenos Aires. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/146403919/Tesisi-Suelo-Cemento>.
- Alfonso Montejo Fonseca (2002) .Ingeniería de Pavimentos. Bogotá, Colombia: Estella Valbuena de Fierro.
- Rico Rodriguez A. y Del Castillo H. (1977). La ingeniería de suelos en las vías terrestres, volumen 2. México: Limusa SA, 505-528.
- Dr. Robin de la Roij & Ing. Christopher Erick Guastaaf Egyed. (2014). Manual de la Nanotecnología en Pavimentos del Concreto Zeolítico Sintético, México: Asociación Mexicana de Vías Terrestres, A.C.
- Universidad Nacional de San Agustín. (2001). Tomo V, mapa de peligros y lineamientos para el plan de usos del suelo de la ciudad de Arequipa. UNSA, Arequipa.
- Williams Huamani Apaza (2016). Tesis “Análisis y diseño de Pavimentos de CCR (Concreto Compactado con Rodillo): Propuesta de Aplicación a la avenida las Torres del distrito de Yura. Universidad Nacional de San Agustín. Tesis para título profesional de Ingeniero Civil, Arequipa Perú.

- Juan Diego Bauzá Castelló (2015). Tesis para acceder al Grado de Doctor “El tratamiento de los suelos arcillosos con cal. comportamiento mecánico y evolución a largo plazo ante cambios de humedad”. Universidad de Sevilla. Recuperado de <https://idus.us.es/xmlui/handle/11441/32957>.
- Norma CE.010 (2006) "Pavimentos Urbanos". Reglamento Nacional de Construcción. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO. Lima, Perú.
- Norma CE.020 "Estabilización de Suelos, Taludes". Reglamento Nacional de Construcción. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento. SENCICO, 2006.
- ASTM-C-39/C-39M Método de la Prueba Estándar para Resistencia a la Compresión de Muestras de Concreto Cilíndricas.
- ASTM-C-511 Método de la Prueba Estándar para Cuarteos de Mezclado y Tanques de Almacenamiento de Agua usados en las Pruebas de Cemento Hidráulicos y Concretos.
- ASTM-C-702 Practica Estándar para Reducción de Muestras de Agregados de Tamaño de Ensayo.
- ASTM-D-1557 Método de la Prueba Estándar para Características de Compactación del Suelo en Laboratorio Usando Esfuerzo Modificado.
- ASSHTO-T-180 Relaciones Humedad – Densidad de Suelos usando un Pisón de 4.54 kg y una caída superior de 457 mm.
- ASTM-D-4318 Método de la Prueba Estándar para límite Líquido, Límite Plástico e índices de Plasticidad de Suelos.

- Manual EG-2013, Especificaciones Técnicas Generales para Construcción de Carreteras. Lima, Perú.

ANEXO 1

Ensayos de laboratorio para el suelo arcilloso natural

ENSAYO GRANULOMÉTRICO

ASTM C136

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO - CAYLLOMA CHIVAY

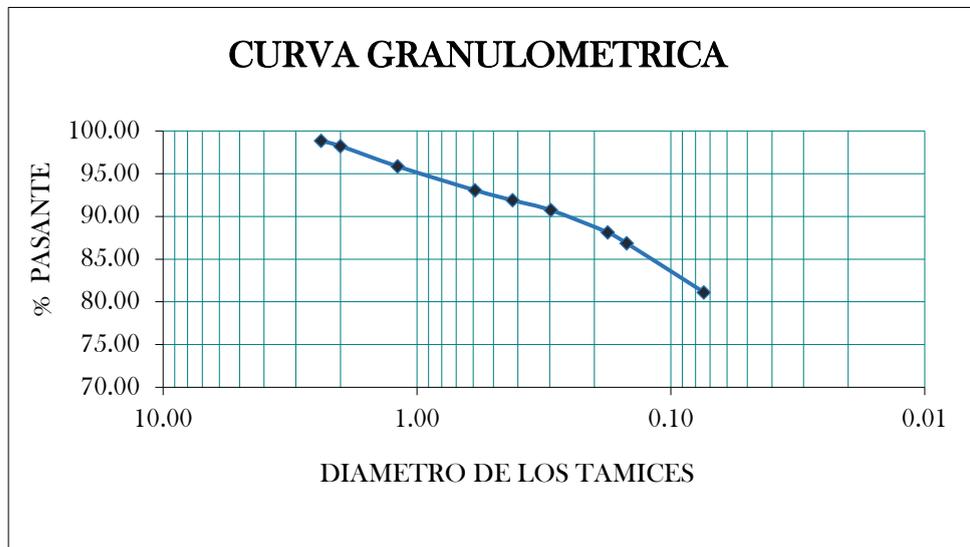
ANÁLISI GRANULOMÉTRICO POR LAVADO

Peso Inicial de la Muestra Seca	857.40	Gr
Peso de la Muestra Después del Lavado	186.50	Gr
Perdida por Lavado	670.90	Gr

Tamiz	Abertura (mm)	Peso retenido (gr)	% Retenido	% Pasante Acumulado
				100.00
8	2.380	9.9	1.15	98.85
10	2.000	5.3	0.62	98.23
16	1.190	20.40	2.38	95.85
30	0.590	23.90	2.79	93.06
40	0.420	10.10	1.18	91.88
50	0.297	9.90	1.15	90.73
80	0.177	22.40	2.61	88.12
100	0.149	10.90	1.27	86.84
200	0.074	49.20	5.74	81.11
Bandeja	0.000	695.40	81.11	0.00

100.00

Total Retenido : **857.40**



ENSAYO DE GRAVEDAD ESPECÍFICA

ASTM C 128

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO - CAYLLOMA CHIVAY

ENSAYO	UND	1	2
Temperatura	°C	19.9	20
Peso de la muestra superf. Seca	gr	284	293.9
Peso de la fiola	gr	185	158.7
Volumen de la fiola (20°C)	cm ³	498.9	500.1
Peso de Fiola + Agua	gr	683.76	657.53
Peso de la muestra + Fiola + Agua	gr	865.6	845.5
Peso específico del agua	gr/cm ³	0.9982	0.9982
Peso específico relativo de los sólidos (Gs)	gr/cm ³	2.78	2.77
Peso específico relativo de los sólidos (Gs)	gr/cm ³	2.8	

ENSAYO LÍMITES DE ATTERBERG

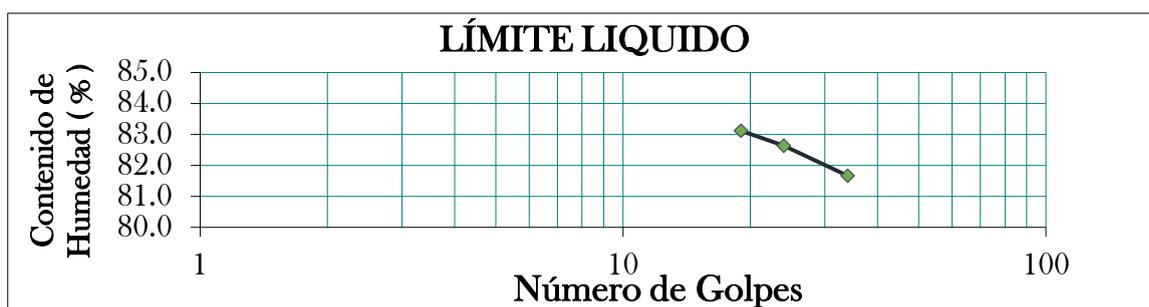
ASTM C136

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO - CAYLLOMA CHIVAY

TARA NUMERO	Und	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO		LIMITES DE CONSISTENCIA		
		1	2	3	1	2			
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	28.48	25.41	28.31	22.23	21.30	Límite Líquido:	LL	82.47 %
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	24.16	22.03	23.78	20.80	19.95	Límite Plástico:	LP	35.76%
Peso de la Tara	Gr	18.87	17.94	18.33	16.57	16.37	Índice de Plasticidad :	IP	46.71%
Peso de la Muestra Seca	Gr	5.29	4.09	5.45	4.23	3.58	Contenido de Humedad :	W _n	15.10%
Peso del Agua	Gr	4.32	3.38	4.53	1.43	1.35	Grado de Consistencia :	K _w	1.44
Contenido de Humedad	%	81.66	82.64	83.12	33.81	37.71	Grado de Consistencia :	Media Dura , Sólida	
Número de Golpes		34	24	19	Prom	35.76			



Número de golpes	Contenido de humedad (%)
34	81.66
24	82.64
19	83.12
25	82.468

ENSAYO COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO

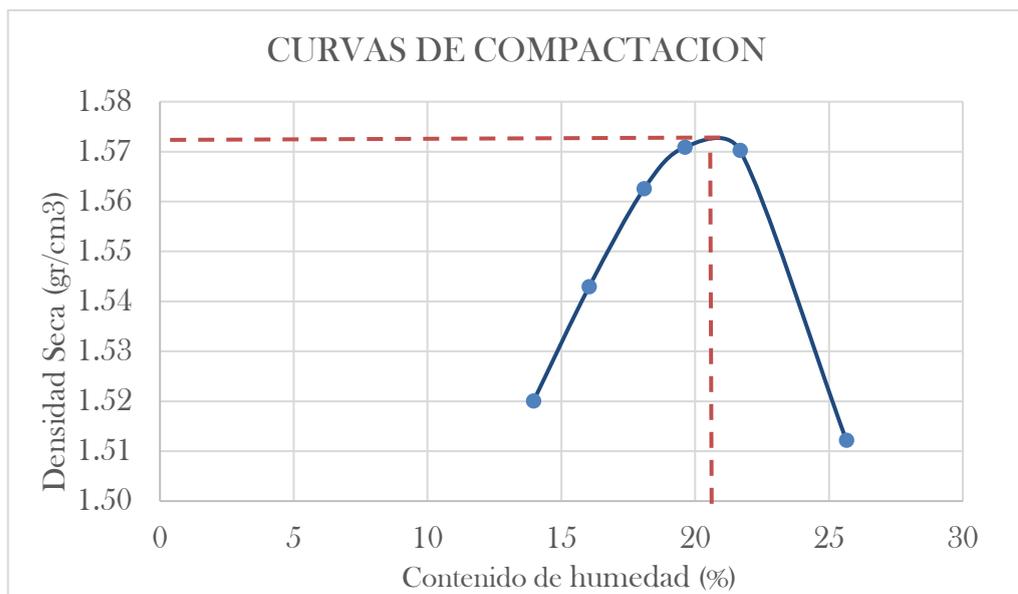
ASTM D 1557

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO - CAYLLOMA CHIVAY

VOLUMEN DEL MOLDE :		947.89 cm^3					
PRUEBA N°		1	2	3	4	5	6
Peso suelo + molde	gr	5817	5872	5924	5956	5986	5976
Peso molde	gr	4175	4175	4175	4175	4175	4175
Peso suelo húmedo compactado	gr	1642	1697	1749	1781	1811	1801
Peso suelo húmedo + tara	gr	400	673	568	860	713	823
Peso del suelo seco + tara	gr	351	580	481	719	586	655
Tara	gr	0	0	0	0	0	0
Peso del agua	gr	49	93	87	141	127	168
Peso del suelo seco	gr	351	580	481	719	586	655
Contenido de agua	%	13.96	16.03	18.09	19.61	21.67	25.65
Peso volumétrico húmedo	gr/cm ³	1.73	1.79	1.85	1.88	1.91	1.90
Peso volumétrico seco	gr/cm ³	1.52	1.54	1.56	1.57	1.57	1.51
DENSIDAD MAXIMA - MDS (gr/cm³)							1.57
HUMEDAD ÓPTIMA - OCH (%)							21.60



ENSAYO DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

ASTM D1883

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: ARCILLA COMPACTADA CON SU HUMEDAD OPTIMA

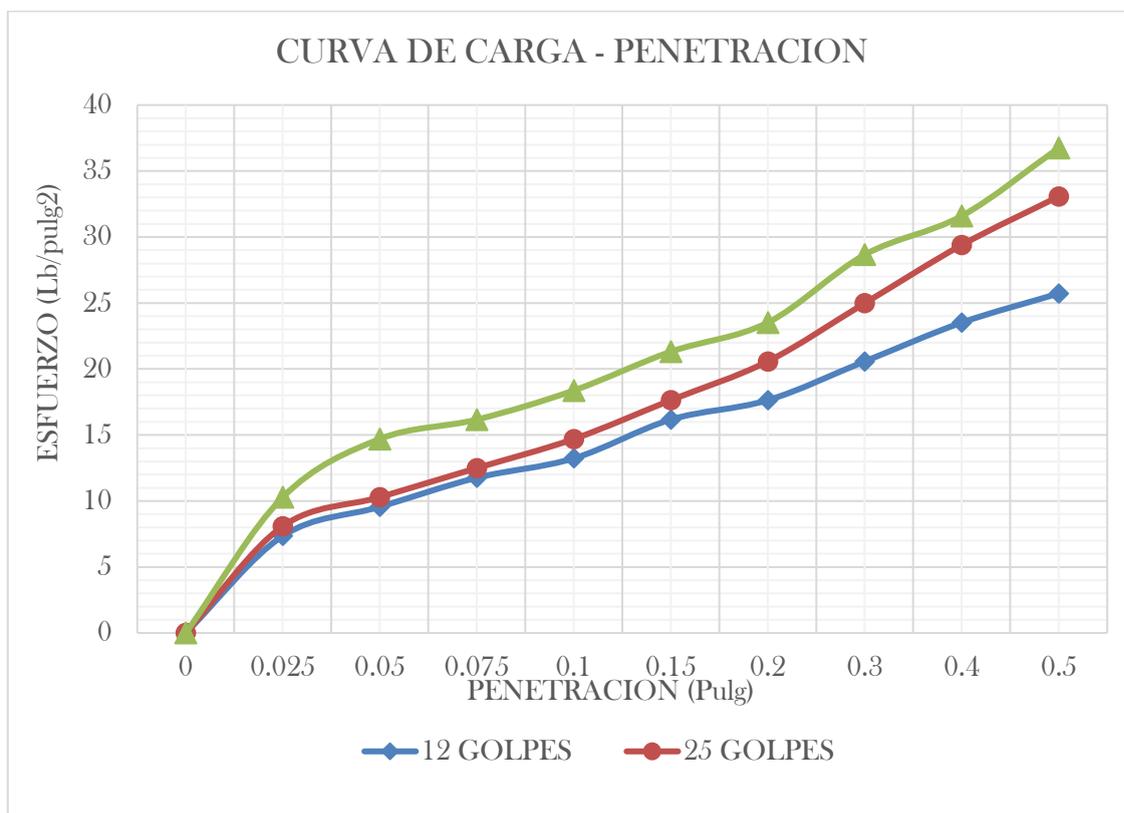
Nº GOLPES	12		25		56	
Condición de la muestra	Sin Saturar	Saturado	Sin Saturar	Saturado	Sin Saturar	Saturado
Volumen del molde	2116.5	2116.5	2118.0	2118.0	2118.7	2118.7
Peso de molde + suelo	11721.0	12471.0	11988.0	12673.0	12618.0	13127.0
Peso del molde	8498.0	8498.0	8479.0	8479.0	8669.0	8669.0
Peso de suelo compact.	3223.0	3973.0	3509.0	4194.0	3949.0	4458.0
Densidad Húmeda	1.523	1.877	1.657	1.980	1.864	2.104

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
	SM-1		SM-2		SM-3	
Peso suelo húmedo	634.10	535.90	571.50	653.70	582.70	614.90
Peso de suelo seco	525.80	357.50	473.20	454.70	481.60	468.10
Peso de agua	108.30	178.40	98.30	199.00	101.10	146.80
Conten. De humedad	20.60	49.90	20.77	43.77	20.99	31.36

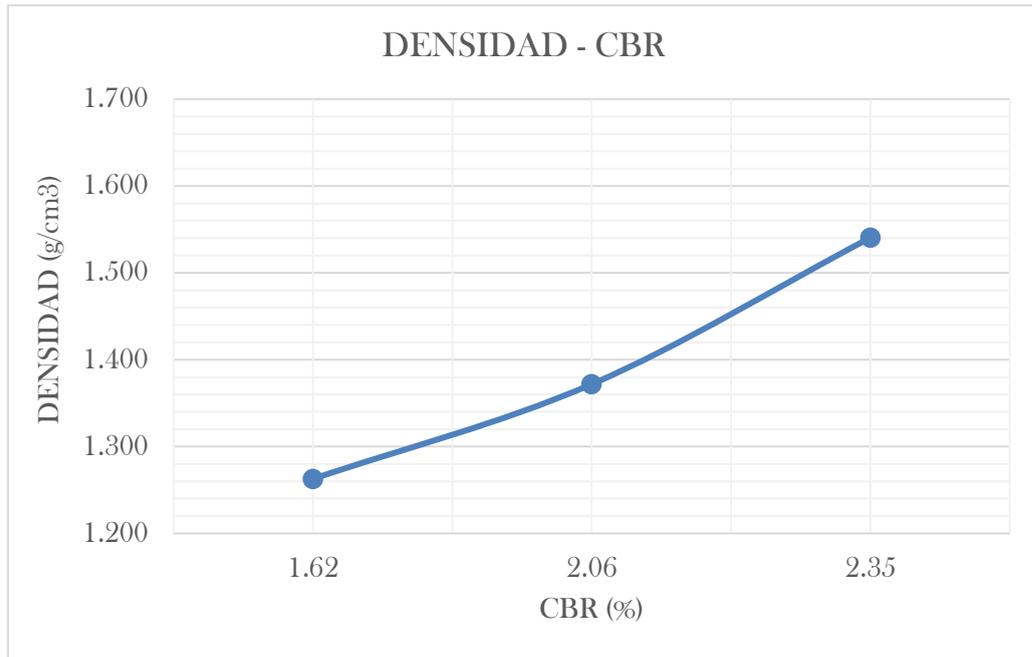
DETERMINACION DE LA DENSIDAD SECA						
Densidad seca g/cm ³	1.263	1.252	1.372	1.377	1.541	1.602
Densidad seca kg/m ³	1262.732	1252.272	1371.785	1377.365	1540.520	1601.817

EXPANSION							
Fecha	Tiempo	Dial	Expans. Pulg.	Dial	Expans. Pulg.	Dial	Expans. Pulg.
31/10/2016	0	0.26	0.10	0.150	0.0591	0.58	0.2283
03/11/2016	72 h	0.80	0.32	0.815	0.3209	1.07	0.4213
ALTURA INICIAL (pulg)		11.56	4.55	11.56	4.55	11.56	4.55
Expansión % de altura inicial		4.69%		5.75%		4.24%	

PENETRACION							
Penetración Pulg.	σ Patròn Lb/pulg.2	Molde N°1		Molde N°2		Molde N°3	
		Dial	Lb/pulg.2	Dial	Lb/pulg.2	Dial	Lb/pulg.2
0		0	0	0	0	0	0
0.025		10	7	11	8	14	10
0.05		13	10	14	10	20	15
0.075		16	12	17	12	22	16
0.1	1000	18	13	20	15	25	18
0.15		22	16	24	18	29	21
0.2	1500	24	18	28	21	32	24
0.3		28	21	34	25	39	29
0.4		32	24	40	29	43	32
0.5		35	26	45	33	50	37



#GOLPES	CBR	DENSIDAD	HUMEDAD
12 GOLPES	1.62	1.263	20.60
25 GOLPES	2.06	1.372	20.77
56 GOLPES	2.35	1.541	20.99



CBR al 100% de Máxima Densidad =	2.35%
CBR al 95% de Máxima Densidad =	2.20%

ANEXO 2

Ensayos de laboratorio para la dosificación de zeolita sintética y cemento

ENSAYO COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557

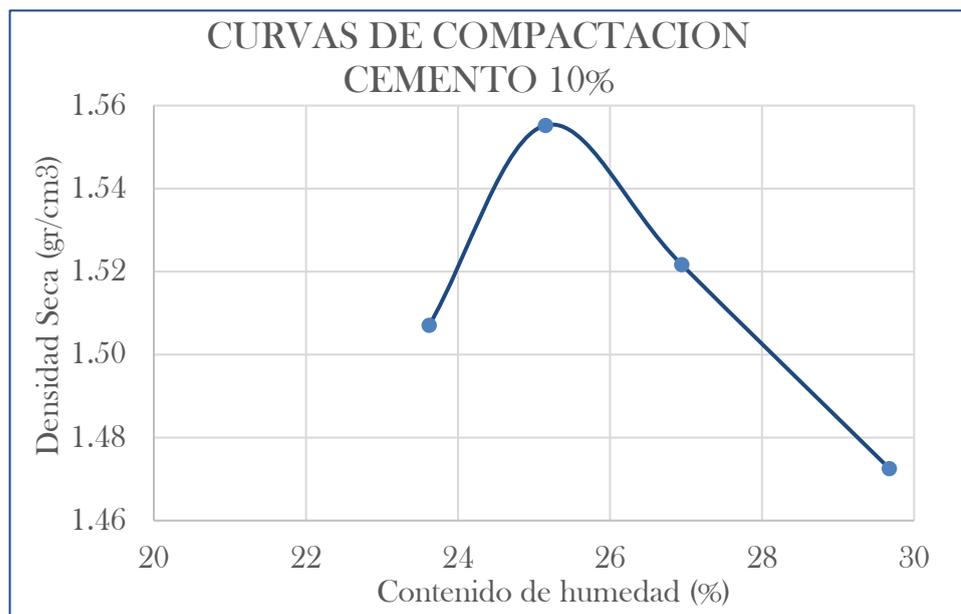
TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO - CAYLLOMA CHIVAY

CEMENTO: 10 %

VOLUMEN DEL MOLDE :		947.89 cm^3			
PRUEBA N°		1	2	3	4
Peso suelo + molde	gr	5941	6020	6006	5985
Peso molde	gr	4175	4175	4175	4175
Peso suelo húmedo compactado	gr	1766	1845	1831	1810
Peso suelo húmedo + tara	gr	507.1	553.8	573.9	618.8
Peso del suelo seco + tara	gr	410.2	442.5	452.1	477.2
Tara	gr	0	0	0	0
Peso del agua	gr	96.9	111.3	121.8	141.6
Peso del suelo seco	gr	410.2	442.5	452.1	477.2
Contenido de agua	%	23.62	25.15	26.94	29.67
Peso volumétrico húmedo	gr/cm ³	1.86	1.95	1.93	1.91
Peso volumétrico seco	gr/cm ³	1.51	1.56	1.52	1.47
DENSIDAD MAXIMA- MDS (gr/cm³)					1.55
HUMEDAD ÓPTIMA - OCH (%)					25.20



ENSAYO COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557

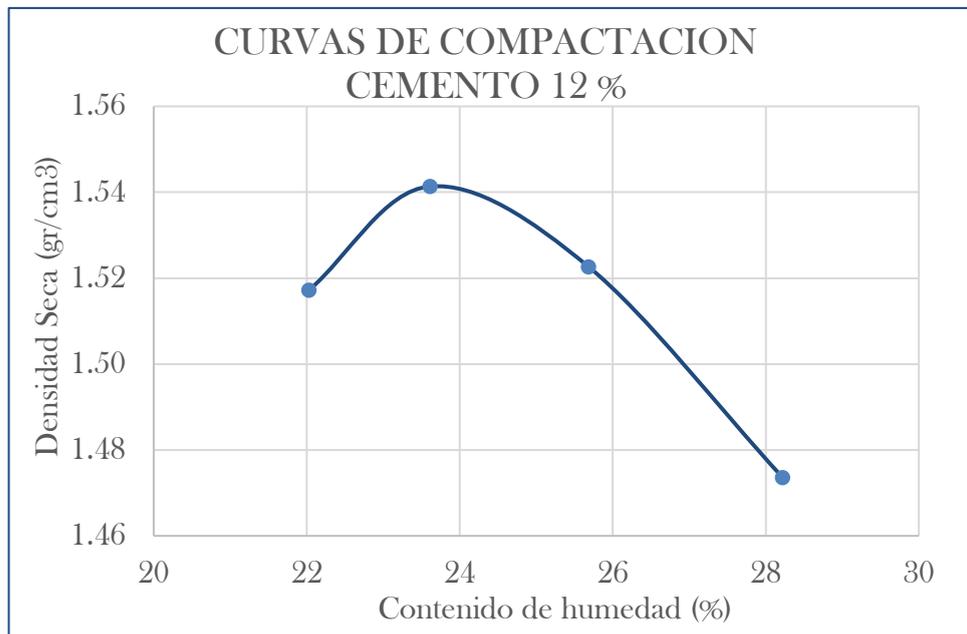
TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO - CAYLLOMA CHIVAY

CEMENTO: 12 %

VOLUMEN DEL MOLDE :		947.89 cm^3			
PRUEBA N°		1	2	3	4
Peso suelo + molde	gr	5930	5981	5989	5966
Peso molde	gr	4175	4175	4175	4175
Peso suelo húmedo compactado	gr	1755	1806	1814	1791
Peso suelo húmedo + tara	gr	532.3	683.2	632.7	545.7
Peso del suelo seco + tara	gr	436.2	552.7	503.4	425.6
Tara	gr	0	0	0	0
Peso del agua	gr	96.1	130.5	129.3	120.1
Peso del suelo seco	gr	436.2	552.7	503.4	425.6
Contenido de agua	%	22.03	23.61	25.69	28.22
Peso volumétrico húmedo	gr/cm ³	1.85	1.91	1.91	1.89
Peso volumétrico seco	gr/cm ³	1.52	1.54	1.52	1.47
DENSIDAD MAXIMA - MDS (gr/cm³)					1.54
HUMEDAD ÓPTIMA - OCH (%)					23.61



ENSAYO COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557

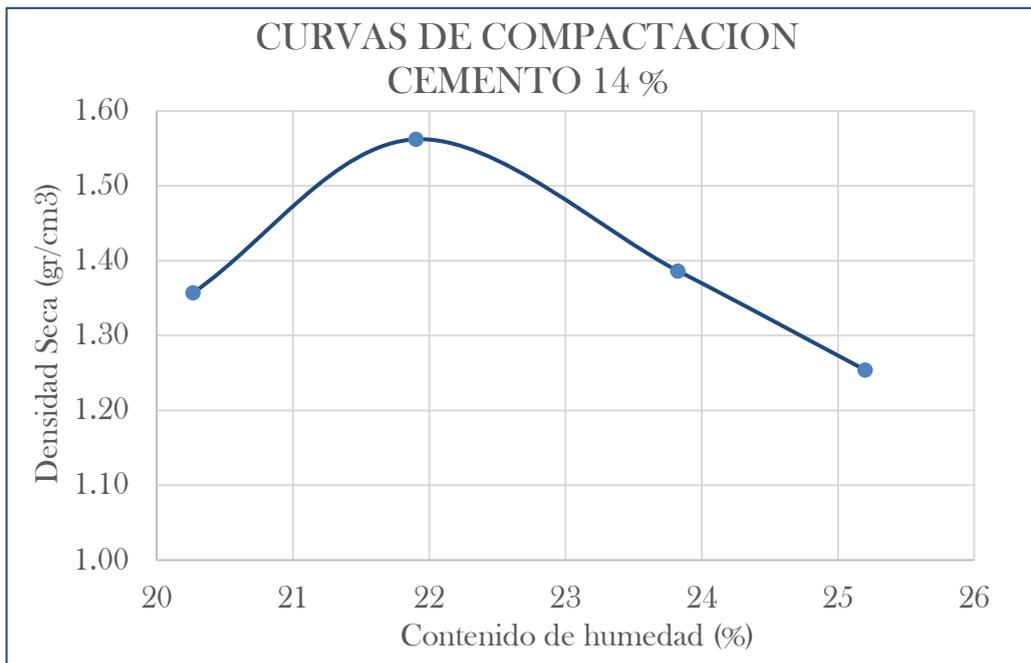
TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO - CAYLLOMA CHIVAY

CEMENTO: 14 %

VOLUMEN DEL MOLDE :		947.89 cm^3			
PRUEBA N°		1	2	3	4
Peso suelo + molde	gr	5722	5980	5802	5663
Peso molde	gr	4175	4175	4175	4175
Peso suelo húmedo compactado	gr	1547	1805	1627	1488
Peso suelo húmedo + tara	gr	532.3	611.1	712.5	651.3
Peso del suelo seco + tara	gr	442.6	501.3	575.4	520.2
Tara	gr	0	0	0	0
Peso del agua	gr	89.7	109.8	137.1	131.1
Peso del suelo seco	gr	442.6	501.3	575.4	520.2
Contenido de agua	%	20.27	21.90	23.83	25.20
Peso volumétrico húmedo	gr/cm ³	1.63	1.90	1.72	1.57
Peso volumétrico seco	gr/cm ³	1.36	1.56	1.39	1.25
DENSIDAD MAXIMA - MDS (gr/cm ³)					1.56
HUMEDAD ÓPTIMA - OCH (%)					21.93



ENSAYO COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557

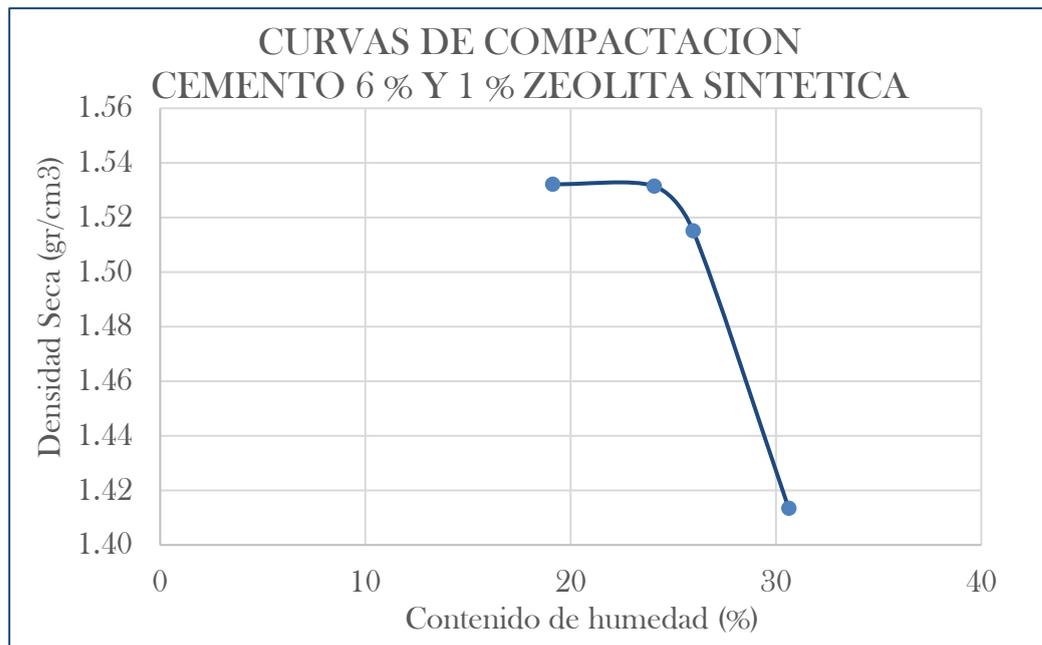
TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO - CAYLLOMA CHIVAY

CEMENTO: 6 % CEMENTO Y 1% ZEOLITA SINTETICA

VOLUMEN DEL MOLDE :		947.89 cm^3			
PRUEBA N°		1	2	3	4
Peso suelo + molde	gr	5905	5976	5984	5925
Peso molde	gr	4175	4175	4175	4175
Peso suelo húmedo compactado	gr	1730	1801	1809	1750
Peso suelo húmedo + tara	gr	551.4	623.8	622	520
Peso del suelo seco + tara	gr	462.9	502.8	493.8	398.1
Tara	gr	0	0	0	0
Peso del agua	gr	88.5	121	128.2	121.9
Peso del suelo seco	gr	462.9	502.8	493.8	398.1
Contenido de agua	%	19.12	24.07	25.96	30.62
Peso volumétrico húmedo	gr/cm ³	1.83	1.90	1.91	1.85
Peso volumétrico seco	gr/cm ³	1.53	1.53	1.52	1.41
DENSIDAD MAXIMA - MDS (gr/cm³)					1.53
HUMEDAD ÓPTIMA - OCH (%)					21.73



ENSAYO COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557

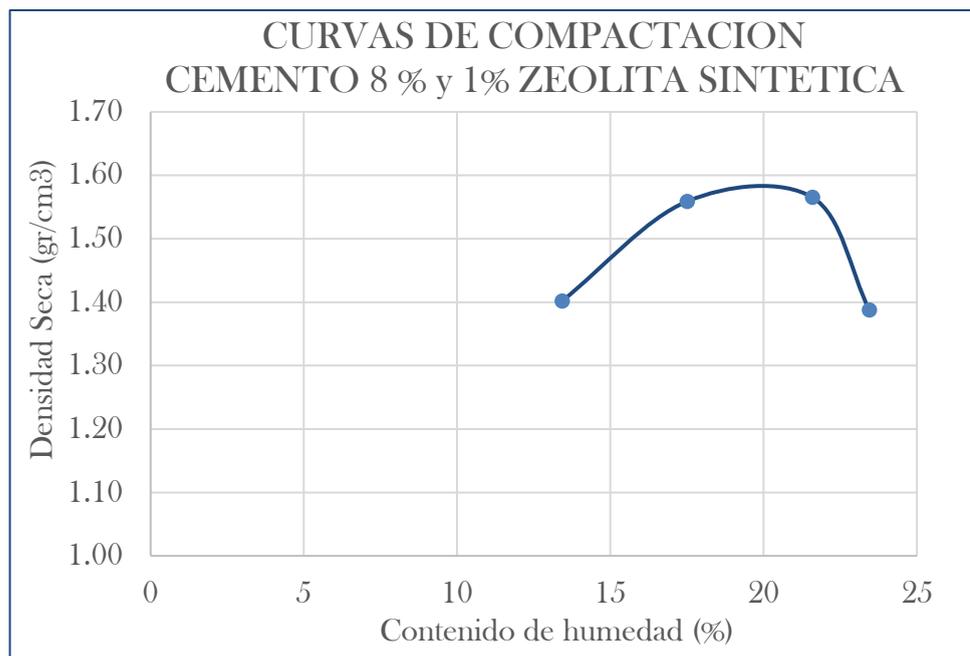
TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO - CAYLLOMA CHIVAY

CEMENTO: 8 % CEMENTO Y 1% ZEOLITA SINTETICA

VOLUMEN DEL MOLDE :		947.89 cm^3			
PRUEBA N°		1	2	3	4
Peso suelo + molde	gr	5682	5911	5979	5799
Peso molde	gr	4175	4175	4175	4175
Peso suelo húmedo compactado	gr	1507	1736	1804	1624
Peso suelo húmedo + tara	gr	742	590.3	501.3	832.4
Peso del suelo seco + tara	gr	654.2	502.4	412.3	674.3
Tara	gr	0	0	0	0
Peso del agua	gr	87.8	87.9	89	158.1
Peso del suelo seco	gr	654.2	502.4	412.3	674.3
Contenido de agua	%	13.42	17.50	21.59	23.45
Peso volumétrico húmedo	gr/cm ³	1.59	1.83	1.90	1.71
Peso volumétrico seco	gr/cm ³	1.40	1.56	1.57	1.39
DENSIDAD MAXIMA - MDS (gr/cm³)					1.58
HUMEDAD ÓPTIMA - OCH (%)					20.05



ENSAYO COMPACTACIÓN - PROCTOR MODIFICADO ASTM D 1557

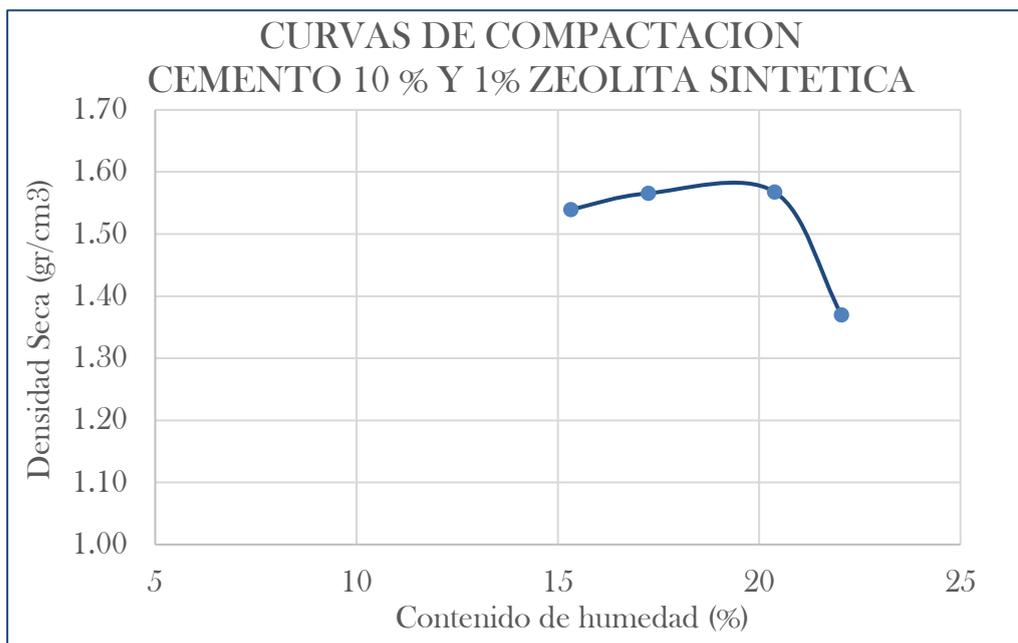
TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO - CAYLLOMA CHIVAY

CEMENTO: 10 % CEMENTO Y 1% ZEOLITA SINTETICA

VOLUMEN DEL MOLDE :		947.89 cm^3			
PRUEBA N°		1	2	3	4
Peso suelo + molde	gr	5858	5915	5964	5760
Peso molde	gr	4175	4175	4175	4175
Peso suelo húmedo compactado	gr	1683	1740	1789	1585
Peso suelo húmedo + tara	gr	677.3	890.5	750.2	830.5
Peso del suelo seco + tara	gr	587.3	759.5	623.2	680.5
Tara	gr	0	0	0	0
Peso del agua	gr	90	131	127	150
Peso del suelo seco	gr	587.3	759.5	623.2	680.5
Contenido de agua	%	15.32	17.25	20.38	22.04
Peso volumétrico húmedo	gr/cm ³	1.78	1.84	1.89	1.67
Peso volumétrico seco	gr/cm ³	1.54	1.57	1.57	1.37
DENSIDAD MAXIMA - MDS (gr/cm ³)					1.60
HUMEDAD ÓPTIMA - OCH (%)					19.01



RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

ASTM C78

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y COMPACTADO CON SU HUMEDAD OPTIMA

CEMENTO: 10 %

10 % CEMENTO - 7 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm ²)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.34	20.00	83.972	923.5	10.998	10.41
2	10.28	20.00	83.000	909.5	10.958	
3	10.32	20.00	83.647	776	9.277	

10 % CEMENTO - 14 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm ²)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.34	20.00	83.972	941.8	11.216	11.79
2	10.30	20.00	83.323	991.9	11.904	
3	10.26	20.10	82.677	1012.2	12.243	

10 % CEMENTO - 28 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm ²)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.22	20.00	82.034	1160.9	14.151	13.62
2	10.34	20.20	83.972	1182.9	14.087	
3	10.21	20.00	81.873	1034.5	12.635	

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

ASTM C78

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y COMPACTADO CON SU HUMEDAD OPTIMA

CEMENTO: 12 %

12 % CEMENTO - 7 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.34	20.00	83.972	1211	14.422	14.08
2	10.28	20.00	83.000	1055.4	12.716	
3	10.32	20.10	83.647	1262.3	15.091	

12 % CEMENTO - 14 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.33	20.00	83.809	1367.8	16.320	15.71
2	10.29	20.00	83.161	1320	15.873	
3	10.25	20.20	82.516	1232.3	14.934	

12 % CEMENTO - 28 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.25	20.00	82.516	1332.4	16.147	17.24
2	10.34	20.00	83.972	1430.2	17.032	
3	10.26	20.00	82.677	1532.6	18.537	

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

ASTM C78

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y COMPACTADO CON SU HUMEDAD OPTIMA

CEMENTO: 14 %

14 % CEMENTO - 7 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.31	20.00	83.485	1719.1	20.592	19.11
2	10.22	20.00	82.034	1597.9	19.479	
3	10.28	20.00	83.000	1432.4	17.258	

14 % CEMENTO - 14 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.34	20.00	83.972	1823.8	21.719	20.04
2	10.30	20.20	83.323	1646.4	19.759	
3	10.26	20.00	82.677	1540.2	18.629	

14 % CEMENTO - 28 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.25	20.00	82.516	2003.4	24.279	21.07
2	10.37	20.00	84.459	1331	15.759	
3	10.28	20.00	83.000	1923.4	23.174	

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

ASTM C78

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTETICA, COMPACTADO CON SU HUMEDAD OPTIMA

CEMENTO: 6 %

ZEOLITA SINTETICA: 1 %

6 % CEMENTO Y 1 % ZEOLITA SINTETICA - 7 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	557.9	6.696	5.90
2	10.31	20.00	83.485	475.9	5.700	
3	10.30	20.00	83.323	441.1	5.294	

6 % CEMENTO Y 1 % ZEOLITA SINTETICA - 14 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.10	83.323	617.4	7.410	6.84
2	10.30	20.00	83.323	620	7.441	
3	10.30	20.00	83.323	472.7	5.673	

6 % CEMENTO Y 1 % ZEOLITA SINTETICA - 28 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.3	20.10	83.323	776.4	9.318	9.39
2	10.3	20.00	83.323	741.7	8.901	
3	10.31	20.00	83.485	830.3	9.946	

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

ASTM C78

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTETICA, COMPACTADO CON SU HUMEDAD OPTIMA

CEMENTO: 8 %

ZEOLITA SINTETICA: 1 %

8 % CEMENTO Y 1 % ZEOLITA SINTETICA - 7 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	841.7	10.102	10.22
2	10.30	20.10	83.323	790.3	9.485	
3	10.30	20.00	83.323	922.3	11.069	

8 % CEMENTO Y 1 % ZEOLITA SINTETICA - 14 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.31	20.00	83.485	939.5	11.254	11.73
2	10.31	20.00	83.485	1009.5	12.092	
3	10.30	20.00	83.323	986.5	11.839	

8 % CEMENTO Y 1 % ZEOLITA SINTETICA - 28 DÍAS						
NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	1331.2	15.976	14.30
2	10.30	20.00	83.323	1211.4	14.539	
3	10.30	20.00	83.323	1032.5	12.392	

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

ASTM C78

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTETICA, COMPACTADO CON SU HUMEDAD OPTIMA

CEMENTO: 10 %

ZEOLITA SINTETICA: 1 %

10 % CEMENTO Y 1 % ZEOLITA SINTETICA - 7 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	1219.9	14.641	14.22
2	10.30	20.00	83.323	1032.3	12.389	
3	10.31	20.00	83.485	1305.3	15.635	

10 % CEMENTO Y 1 % ZEOLITA SINTETICA - 14 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	1353.5	16.244	16.67
2	10.30	20.00	83.323	1460.9	17.533	
3	10.30	20.00	83.323	1352.3	16.230	

10 % CEMENTO Y 1 % ZEOLITA SINTETICA - 28 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	1689	20.270	19.66
2	10.30	20.00	83.323	1532.5	18.392	
3	10.30	20.00	83.323	1692.5	20.312	

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

ASTM C78

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y COMPACTADO CON SU HUMEDAD OPTIMA

CEMENTO: 10 %

ZEOLITA SINTETICA: 0.5 %

10 % CEMENTO Y 0.5 % ZEOLITA SINTETICA - 7 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	993	11.917	10.40
2	10.30	20.00	83.323	832.4	9.990	
3	10.31	20.00	83.485	776.2	9.316	

10 % CEMENTO Y 0.5 % ZEOLITA SINTETICA - 14 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	1032.5	12.392	12.06
2	10.30	20.00	83.323	1002.3	12.029	
3	10.30	20.00	83.323	980.4	11.76	

10 % CEMENTO Y 0.5 % ZEOLITA SINTETICA - 28 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	1123.2	13.480	13.85
2	10.30	20.00	83.323	1134.5	13.616	
3	10.30	20.00	83.323	1203.4	14.443	

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN

ASTM C78

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ARCILLOSO ESTABILIZADO CON CEMENTO Y COMPACTADO CON SU HUMEDAD OPTIMA

CEMENTO: 10 %

ZEOLITA SINTETICA: 1.5 %

10 % CEMENTO Y 1.5 % ZEOLITA SINTETICA - 7 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	821	9.853	9.58
2	10.30	20.00	83.323	731.2	8.775	
3	10.31	20.00	83.485	845.3	10.125	

10 % CEMENTO Y 1.5 % ZEOLITA SINTETICA - 14 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	934.5	11.215	11.70
2	10.30	20.00	83.323	987.2	11.848	
3	10.30	20.00	83.323	1003.2	12.040	

10 % CEMENTO Y 1.5 % ZEOLITA SINTETICA - 28 DÍAS

NUMERO	DIAM. (cm)	ALTURA (cm)	AREA(cm)	C.MAX(kg)	RES. COMP.	PROM
1	10.30	20.00	83.323	1102.3	13.229	12.50
2	10.30	20.00	83.323	1032.2	12.388	
3	10.30	20.00	83.323	989.4	11.874	

ENSAYO DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

ASTM D1883

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ESTABILIZADO CON 10% CEMENTO Y 1% ZEOLITA SINTETICA

SATURACION: 4 DIAS

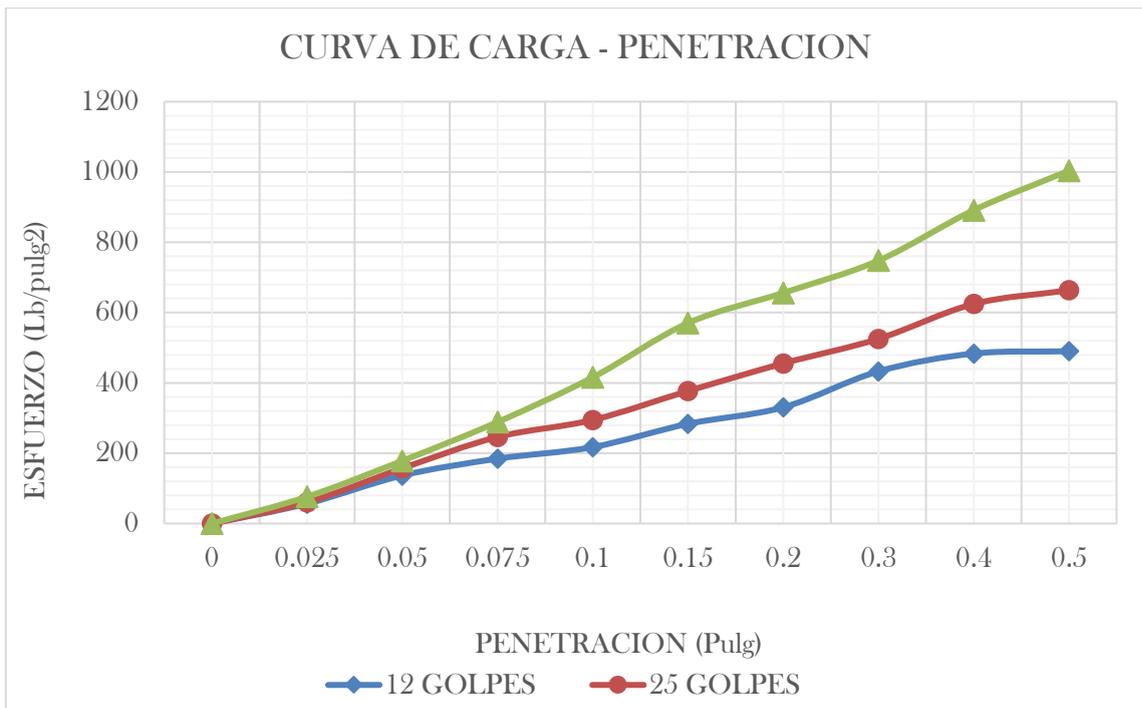
Nº GOLPES	12		25		56	
	Sin Saturar	Saturado	Sin Saturar	Saturado	Sin Saturar	Saturado
Condición de la muestra						
Volumen del molde	2116.5	2116.5	2118.0	2118.0	2118.7	2118.7
Peso de molde + suelo	11737.0	12258.0	12034.0	12444.0	12700.0	12943.0
Peso del molde	8498.0	8498.0	8479.0	8479.0	8669.0	8669.0
Peso de suelo compact.	3239.0	3760.0	3555.0	3965.0	4031.0	4274.0
Densidad Húmeda	1.530	1.777	1.678	1.872	1.903	2.017

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
	SM-1		SM-2		SM-3	
Peso suelo húmedo	600.60	864.70	600.40	664.10	500.30	751.10
Peso de suelo seco	490.50	628.00	491.90	502.50	410.10	579.90
Peso de agua	110.10	236.70	108.50	161.60	90.20	171.20
Conten. De humedad	22.45	37.69	22.06	32.16	21.99	29.52

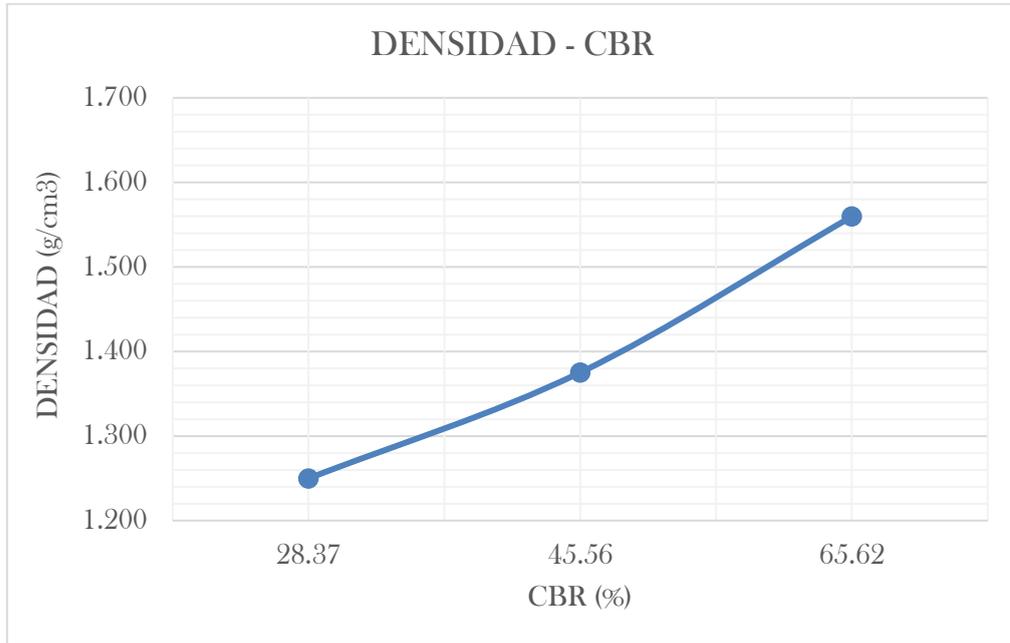
DETERMINACION DE LA DENSIDAD SECA						
Densidad seca g/cm ³	1.250	1.290	1.375	1.417	1.560	1.558
Densidad seca kg/m ³	1249.83	1290.23	1375.14	1416.511	1559.5	1557.50
	5	8	9		91	2

EXPANSION							
Fecha	Tiempo	Dial	Expans. Pulg.	Dial	Expans. Pulg.	Dial	Expans. Pulg.
31/10/2016	0	0.093	0.04	0.180	0.0709	0.280	0.1102
03/11/2016	72 h	0.269	0.11	0.365	0.1437	0.461	0.1815
ALTURA INICIAL (pulg)		11.56	4.55	11.56	4.55	11.56	4.55
Expansión % de altura inicial		1.52%		1.60%		1.57%	

PENETRACIÓN							
Penetración Pulg.	σ Patrón Lb/pulg.2	Molde N°1		Molde N°2		Molde N°3	
		Dial	Lb/pulg.2	Dial	Lb/pulg.2	Dial	Lb/pulg.2
0		0	0	0	0	0	0
0.025		77	57	82	60	104	76
0.05		186	137	214	157	243	179
0.075		251	184	335	246	393	289
0.1	1000	296	218	401	295	566	416
0.15		386	284	513	377	776	570
0.2	1500	450	331	620	456	893	656
0.3		589	433	715	525	1018	748
0.4		658	484	850	625	1213	891
0.5		667	490	903	664	1366	1004



#GOLPES	CBR	DENSIDAD	HUMEDAD
12 GOLPES	28.37	1.250	22.45
25 GOLPES	45.56	1.375	22.06
56 GOLPES	65.62	1.560	21.99



CBR al 100% de Máxima Densidad =	65.62%
CBR al 95% de Máxima Densidad =	57.34%

ENSAYO DE SOPORTE CALIFORNIA (CBR)

ASTM D1883

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ESTABILIZADO CON 10% CEMENTO Y 1% ZEOLITA SINTETICA

SATURACION: 7 DIAS

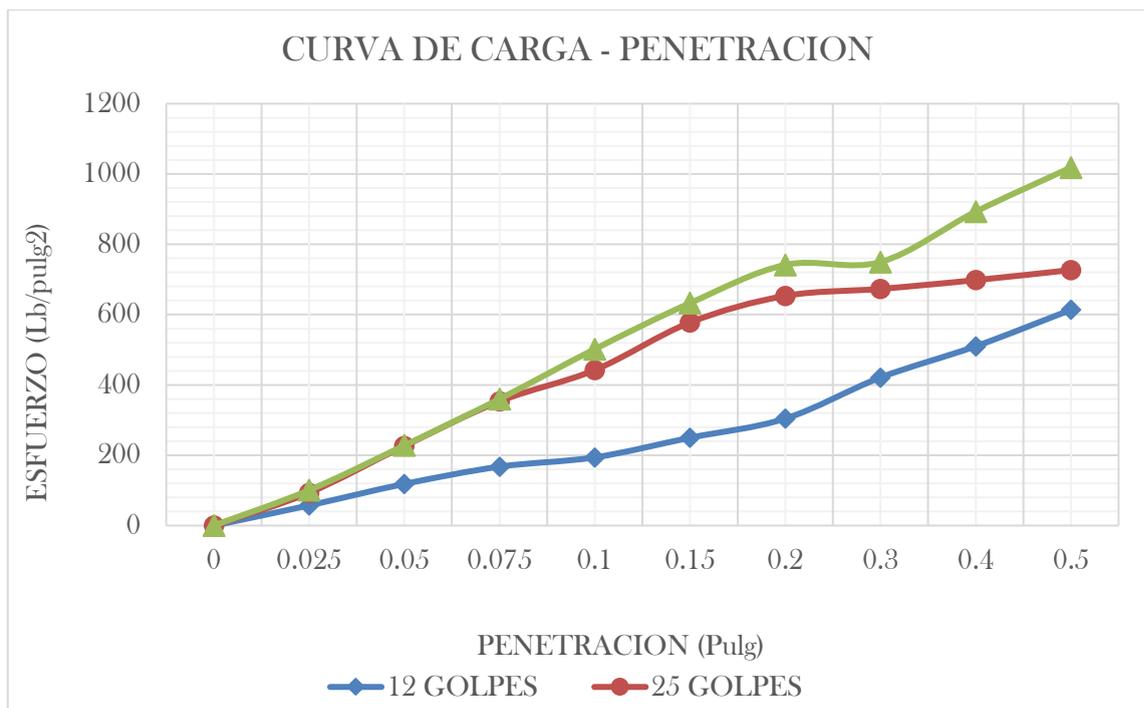
Nº GOLPES	12		25		56	
	Sin Saturar	Saturado	Sin Saturar	Saturado	Sin Saturar	Saturado
Condición de la muestra						
Volumen del molde	2116.5	2116.5	2118.0	2118.0	2118.7	2118.7
Peso de molde + suelo	11834.0	12343.0	12094.0	12474.0	12682.0	12925.0
Peso del molde	8498.0	8498.0	8479.0	8479.0	8669.0	8669.0
Peso de suelo compact.	3336.0	3845.0	3615.0	3995.0	4013.0	4256.0
Densidad Húmeda	1.576	1.817	1.707	1.886	1.894	2.009

DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD						
	SM-1		SM-2		SM-3	
Peso suelo humedo	914.00	864.70	735.00	664.10	618.00	751.10
Peso de suelo seco	804.10	628.00	632.50	502.50	526.90	579.90
Peso de agua	109.90	236.70	102.50	161.60	91.10	171.20
Conten. De humedad	13.67	37.69	16.21	32.16	17.29	29.52

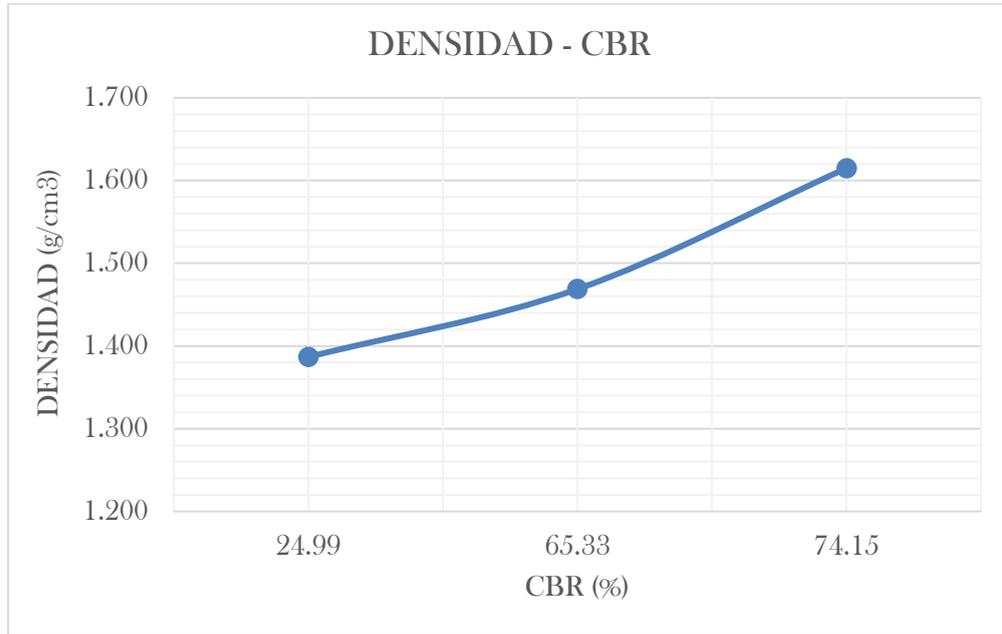
DETERMINACION DE LA DENSIDAD SECA						
Densidad seca g/cm ³	1.387	1.319	1.469	1.427	1.615	1.551
Densidad seca kg/m ³	1386.685	1319.406	1468.776	1427.228	1614.907	1550.943

EXPANSION							
Fecha	Tiempo	Dial	Expans. Pulg.	Dial	Expans. Pulg.	Dial	Expans. Pulg.
31/10/2016	0	0.041	0.02	0.570	0.2244	0.041	0.0161
03/11/2016	72 h	0.181	0.07	0.725	0.2854	0.181	0.0713
ALTURA INICIAL (pulg)		11.56	4.55	11.56	4.55	11.56	4.55
Expansión % de altura inicial		1.21%		1.34%		1.21%	

PENETRACIÓN							
Penetración Pulg.	σ Patrón Lb/pulg.2	Molde N°1		Molde N°2		Molde N°3	
		Dial	Lb/pulg.2	Dial	Lb/pulg.2	Dial	Lb/pulg.2
0		0	0	0	0	0	0
0.025		78	57	127	93	137	101
0.05		161	118	308	226	310	228
0.075		228	168	481	353	490	360
0.1	1000	264	194	602	442	683	502
0.15		340	250	786	578	861	633
0.2	1500	414	304	889	653	1009	741
0.3		573	421	916	673	1020	750
0.4		694	510	950	698	1215	893
0.5		835	614	989	727	1386	1019



#GOLPES	CBR	DENSIDAD	HUMEDAD
12 GOLPES	24.99	1.387	13.67
25 GOLPES	65.33	1.469	16.21
56 GOLPES	74.15	1.615	17.29



CBR al 100% de Máxima Densidad =	74.15%
CBR al 95% de Máxima Densidad =	64.14%

ENSAYO LIMITES DE ATTERBERG

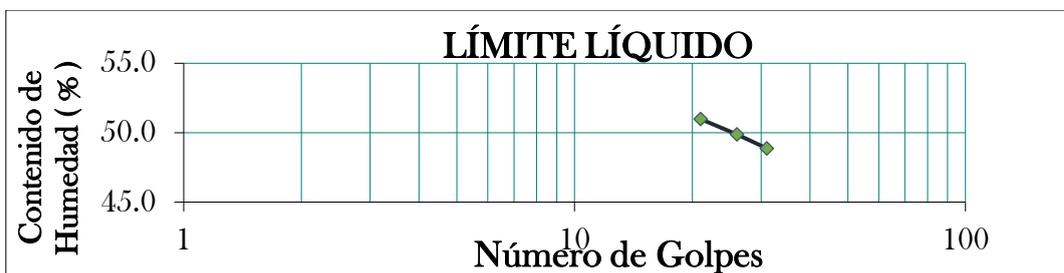
ASTM C136

TESIS: “UTILIZACION DE NANOTECNOLOGIA: CEMENTO - ZEOLITA SINTETICA, EN LA ESTABILIZACION DE SUELOS ARCILLOSOS CON FINES DE BASE PARA PAVIMENTO FLEXIBLE”

TESISTA: BACH. MAIRA DEL ROSARIO RODRIGUEZ VARGAS

MUESTRA: SUELO ESTABILIZADO CON 10% CEMENTO Y 1% ZEOLITA SINTETICA

TARA NUMERO	Und	LIMITE LIQUIDO			LIMITE PLASTICO		LIMITES DE CONSISTENCIA		
		1	2	3	1	2			
Peso Tara + Muestra Húmeda	Gr	26.15	24.22	24.49	24.14	24.54	Límite Líquido:	LL	50.06 %
Peso Tara + Muestra Seca	Gr	23.76	22.13	22.41	21.76	21.95	Límite Plástico:	LP	46.14 %
Peso de la Tara	Gr	18.87	17.94	18.33	16.57	16.37	Índice de Plasticidad :	IP	3.92%
Peso de la Muestra Seca	Gr	4.89	4.19	4.08	5.19	5.58			
Peso del Agua	Gr	2.39	2.09	2.08	2.38	2.59			
Contenido de Humedad	%	48.88	49.88	50.98	45.86	46.42			
Número de Golpes		31	26	21	Prom	46.14			



Número de golpes	Contenido de humedad (%)
31	48.88
26	49.88
21	50.98
25	50.056

ANEXO 3

Metrado para el diseño del pavimento flexible

HOJA DE METRADOS

PAVIMENTACION DE UNA VIA DE 3,500 M DE LONGITUD Y 7.20 M DE ANCHO EN UN SUELO ARCILLOSO, PAVIEMTO FLEXIBLE EN FRIO. TOMAMOS EN CUENTA QUE LA OBRA SE ENCUENTRA A UNA DM DE 60 KM DE UNA CANTERA

<i>Ítem</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Ancho</i>	<i>Largo</i>	<i>Alto</i>	<i>Subtotal</i>	<i>Total</i>
01	<u>OBRAS PROVISIONALES</u>							
01.01	CARTEL DE OBRA (3.60 X 8.50M - C/BANNER)	UND	1.00				1.00	1.00
02	<u>TRABAJOS PRELIMINARES</u>							
02.01	MOVILIZACION Y DESMOVILIZACION DE EQUIPOS Y/O MAQUINARIA	GLB	1.00				1.00	1.00
02.02	TRAZO, NIVELACION Y REPLANTEO PRELIMINAR	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
02.03	TRAZO NIVELACION Y REPLANTEO DURANTE LA OBRA	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
03	<u>MITIGACION DE IMPACTO AMBIENTAL</u>							
03.01	RIEGO DE VIA CON TANQUE CISTERNA	M2	3.00	7.20	3,500.00		75,600.00	75,600.00
03.02	PROGRAMA Y MANEJO DE MONITOREO AMBIENTAL	GLB	1.00				1.00	1.00
04	<u>MOVIMIENTO DE TIERRAS</u>							
04.01	DESBROCE Y LIMPIEZA DE TERRENO	M2		7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
04.02	CORTE MASIVO DE TERRENO A MAQUINA	M3	1.00	7.20	3,500.00	1.36	34,272.00	34,272.00
04.03	NIVELACION Y COMPACTACION DE SUBRASANTE	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
04.04	ELIMINACION DE MATERIAL EXCEDENTE	M3	espj. 1.43		85,044.96		85,044.96	85,044.96
05	<u>PAVIMENTOS</u>							
05.01	<u>SUB BASE</u>							
05.01.01	CARGUIO DE MATERIAL PARA SUBBASE	M3	1.00	7.20	3,500.00	0.64	16,002.00	16,002.00
05.01.02	TRANSPORTE DM=20.00 KM	M3	1.00	7.20	3,500.00	0.64	16,002.00	16,002.00
05.01.03	REFINE Y COMPACTACION DE SUB RASANTE	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.01.04	EXTENDIDO Y COMPACTACION DE SUB BASE	m2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.02	<u>BASE</u>							
05.02.01	CARGUIO DE MATERIAL PARA BASE	M3	1.00	7.20	3,500.00	0.13	3,293.64	3,293.64
05.02.02	TRANSPORTE DM=20.00 KM	M3	1.00	7.20	3,500.00	0.13	3,293.64	3,293.64
05.02.03	EXTENDIDO Y COMPACTACION DE BASE GRANULAR	m2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.03	<u>IMPRIMACION</u>							
05.03.01	IMPRIMACION ASFALTICA	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.03.02	ARENADO DE SUPERFICIE IMPRIMADA	m2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.03.03	BARRIDO DE SUPERFICIE IMPRIMADA	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.04	<u>CARPETA ASFALTICA EN FRIO E=4.5"</u>							
05.04.01	PREPARACION DE MEZCLA ASFALTICA EN FRIO	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.04.02	CARGUIO DE MEZCLA ASFALTICA EN FRIO	M3	1.00	7.20	3,500.00	0.11	2,880.36	2,880.36
05.04.03	TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA A OBRA	M3	1.00	7.20	3,500.00	0.11	2,880.36	2,880.36
05.04.04	RIEGO DE LIGA CON LIQUIDO ASFALTICO	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00

05.04.05	EXTENDIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFALTICA EN FRIO	M2	1.00	7.20	3,500.00	25,200.00	25,200.00
05.04.06	ARENADO DE SUPERFICIE CARPETEADA	M2	1.00	7.20	3,500.00	25,200.00	25,200.00
06	<u>SEÑALIZACION Y SEGURIDAD VIAL</u>						
06.01	PINTURA DISCONTINUA EN PAVIMENTO	M2	1.00	7.20	3,500.00	25,200.00	25,200.00
07	<u>VARIOS</u>						
07.01	LIMPIEZA FINAL DE OBRA	M2	1.00	7.20	3,500.00	25,200.00	25,200.00

HOJA DE METRADOS

PAVIMENTACION DE UNA VIA DE 3,500 M DE LONGITUD Y 7.20 M DE ANCHO EN UN SUELO ARCILLOSO, PAVIEMTO FLEXIBLE EN FRIO. TOMAMOS EN CUENTA QUE LA OBRA SE ENCUENTRA A UNA DM DE 60 KM DE UNA CANTERA

Ítem	Descripción	Unidad	Cantida d	Ancho	Largo	Alto	Subtotal	Total
01	<u>OBRAS PROVISIONALES</u>							
01.01	CARTEL DE OBRA (3.60 X 8.50M - C/BANNER)	UND	1.00				1.00	1.00
02	<u>TRABAJOS PRELIMINARES</u>							
02.01	MOVILIZACION Y DESMOVILIZACION DE EQUIPOS Y/O MAQUINARIA	GLB	1.00				1.00	1.00
02.02	TRAZO, NIVELACION Y REPLANTEO PRELIMINAR	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
02.03	TRAZO NIVELACION Y REPLANTEO DURANTE LA OBRA	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
03	<u>MITIGACION DE IMPACTO AMBIENTAL</u>							
03.01	RIEGO DE VIA CON TANQUE CISTERNA	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
03.02	PROGRAMA Y MANEJO DE MONITOREO AMBIENTAL	GLB	1.00				1.00	1.00
04	<u>MOVIMIENTO DE TIERRAS</u>							
04.01	DESBROCE Y LIMPIEZA DE TERRENO	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
04.02	NIVELACION Y COMPACTACION DE SUBRASANTE	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
04.03	ELIMINACION DE MATERIAL EXCEDENTE	M3	espj. 1.43		36,036.00		36,036.00	36,036.00
05	<u>PAVIMENTOS</u>							
05.01	<u>BASE</u>							
05.01.01	MEZCLADO, HOMOGENIZADO Y EXTENDIO DE BASE PARA PAVIMENTO CON CEMENTO Y ZEOLITA SINTETICA	M3	1.00	7.20	3,500.00	0.58	14,616.00	14,616.00
05.01.03	COMPACTACION DE BASE ESTABILIZADA CON C° Y Z.S	M3	1.00	7.20	3,500.00	0.58	25,200.00	25,200.00
05.01.04	CURADO DE LA SUPERFICIE ESTABILIZADA CON C° Y Z.S	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.02	<u>IMPRIMACION</u>							
05.02.01	IMPRIMACION ASFALTICA	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.03.02	ARENADO DE SUPERFICIE IMPRIMADA	m2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.03.03	BARRIDO DE SUPERFICIE IMPRIMADA	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.03	<u>CARPETA ASFALTICA EN FRIO E=4"</u>							
05.03.01	PREPARACION DE MEZCLA ASFALTICA EN FRIO	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.03.02	CARGUIO DE MEZCLA ASFALTICA EN FRIO	M3	1.00	7.20	3,500.00	0.11	2,772.00	2,772.00
05.03.03	TRANSPORTE DE MEZCLA ASFALTICA A OBRA	M3	1.00	7.20	3,500.00	0.11	2,772.00	2,772.00
05.03.04	RIEGO DE LIGA CON LIQUIDO ASFALTICO	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.03.05	EXTENDIDO Y COMPACTADO DE MEZCLA ASFALTICA EN FRIO	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
05.03.06	ARENADO DE SUPERFICIE CARPETEADA	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
06	<u>SEÑALIZACION Y SEGURIDAD VIAL</u>							
06.01	PINTURA DISCONTINUA EN PAVIMENTO	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00
07	<u>VARIOS</u>							
07.01	LIMPIEZA FINAL DE OBRA	M2	1.00	7.20	3,500.00		25,200.00	25,200.00