



# UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

## FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

### ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



#### TESIS

---

**“EVALUACIÓN COMPARATIVA DEL DISEÑO DE UN PAVIMENTO RÍGIDO CON SUBBASE TRATADA CON MÍNIMA CANTIDAD DE CEMENTO Y UNA SIN TRATAR, UTILIZANDO MATERIAL DE LA CANTERA DE QUILLAHUATA Y APLICADO A TRÁFICO VARIADO”**

---

**Presentado por:**

Bach. Sencia Garcia Erwin Ronald

**Para optar por el título profesional de Ingeniero Civil**

**Asesor:**

Ing. Salas Fortón Edson

CUSCO – PERÚ  
2018



### **Dedicatoria**

*Dedico este presente trabajo de investigación a Dios, porque de Él, por Él y para Él son todas las cosas y sin Él no habría tenido las fuerzas necesarias para terminarlo, además, no habría logrado el rompimiento de muchas estructuras mentales, conseguidas en el transcurso de mi vida hasta este momento.*



## Agradecimientos

*Agradezco a Dios por poner gracia en todas las personas que me ayudaron en el desarrollo de esta investigación, por direccionarme cada vez que se presentó un problema, por brindarme este tema de investigación que sacó lo mejor de mí y por darme fuerzas para permanecer y continuar hacia adelante.*

*A mi madre, Gladys Garcia Fuentes, por su apoyo incondicional a lo largo del desarrollo del trabajo de investigación.*

*A mi hermano, Rodrigo A. Sencia Garcia, por su apoyo en momentos donde lo necesitaba.*

*Al Ing. Edson Salas Fortón, por su guía y asesoramiento durante el desarrollo de la tesis y por compartir sus conocimientos y experiencias para poder desarrollar la investigación con excelencia.*

*Al Ing. Victor Chacón Sánchez, por su guía durante el desarrollo de la investigación y durante el estudio de la carrera profesional.*

*Al Ing. Miguel Angel Vilca Rojas, por su guía en la definición del tema de investigación.*

*A la Ing. Simoné Karim Sovero Ancheyta, por su disposición, guía, consejos y tiempo brindado en la revisión del trabajo de investigación.*

*A los Ings. Eigner Roman Villegas y Jose A. Montesinos Cervantes, por su disposición de tiempo que me brindaron para poder revisar y corregir el trabajo de investigación.*

*Al Pr. Mario, Sr. Marino y a Leonidas, por su ayuda durante la construcción de la cámara húmeda.*

*A Bladimir, Shakti, Charly, Alfredo y Gustavo, encargados de laboratorio, por brindarme la facilidad para poder llevar a cabo los ensayos.*



*A Jheyson, José, Ivan, Adrian, Karen, Kevin y Hernesto, por su constante y desinteresada ayuda durante el desarrollo de la investigación, no solo me apoyaron, sino que Dios puso en ellos gracia para conmigo en los momentos de mayores dificultades.*

*A mis compañeros de carrera y amigos, por su apoyo y amistad durante el tiempo de estudio y al momento de realizar el presente trabajo de investigación.*

*A mi apóstol, mis pastores y hermanos en Cristo, por su presión, sus constantes oraciones y por andar en un camino distinto y verdadero; buscando un cambio en la sociedad y el mundo, donde la Palabra de Dios nos guíe a vivir una vida plena en Cristo Jesús Señor nuestro.*



## Resumen

En este trabajo de investigación se estudiaron muestras de suelo en estado natural y suelo adicionado con 2, 4 y 6% de cemento, a fin, de determinar la mínima cantidad de cemento necesaria para alcanzar una resistencia de  $18 \text{ kg/cm}^2$  (mínima requerida según las EG-2013), resultando en un valor de 3.83%, asimismo, se estudió la incidencia en el diseño de pavimentos rígidos de una subbase de 10 cm de espesor tratada con 3.83% de cemento respecto a la incidencia en el diseño de una subbase de 20 cm de espesor de suelo natural, resultando en una reducción del espesor de losa de 3.91 cm a 2.3 cm para tráficos de 150,000 de ESALs a 7'500,000 de ESALs respectivamente. Para ello, se realizaron ensayos de caracterización de los materiales, compactación y resistencia, con la finalidad, de determinar el módulo de reacción combinado, el cual, intervino en el diseño del pavimento rígido.

El mínimo contenido de cemento, 3.83%, se determinó mediante la rotura a compresión de especímenes elaborados con 2, 4 y 6% de cemento, a 7 días de curado húmedo, obteniendo resultados de 11.7, 22.0 y 33.9  $\text{kg/cm}^2$  respectivamente, luego, se analizó la sensibilidad por humedad y densidad de compactación de la mezcla, obteniendo valores de 18.1, 22.0 y 20.6  $\text{kg/cm}^2$  en especímenes elaborados con -1, +0 y +1% de humedad respecto a la óptima y valores de 11.8, 16.2 y 21.5  $\text{kg/cm}^2$  en especímenes elaborados al 95, 97 y 100% de la máxima densidad seca. Con ello, se comprobó que la resistencia a compresión no es menor a  $18 \text{ kg/cm}^2$  para las condiciones de diseño ( $\pm 1\%$  de humedad y al 100% de la máxima densidad seca).

Muestras de suelo natural y muestras adicionadas con 3.83% de cemento, con 7 días de curado húmedo, alcanzaron valores de CBR de 20.34% y 293.03% respectivamente. Con lo cual, se determinó el módulo resiliente del suelo natural por medio de una correlación en función del CBR, obteniendo un valor de 123.07 MPa (17,849.20 psi). El módulo resiliente del suelo cemento, se determinó en función de la velocidad de propagación de onda en especímenes con 3.83% de cemento, compactados en condiciones óptimas y con 7 días de curado húmedo, obteniendo un valor de 4,481.24 MPa (649,925.37 psi) para velocidades de onda longitudinal y transversal de 1,538.97 y 888.52 m/s respectivamente. Luego, con los valores de módulo resiliente se calcularon módulos de reacción combinado de 12.13 MPa/m para la subbase de suelo natural y de 86.66 MPa/m para la subbase tratada con mínima cantidad de cemento.

**PALABRAS CLAVE:** Subbase, diseño de pavimento, resistencia, cemento, análisis de sensibilidad.



## Abstract

In this research work soil samples were studied in natural state and soil added with 2, 4 and 6% cement, in order to determine the minimum amount of cement needed to reach a strength of 18 kg/cm<sup>2</sup> (minimum required according to the EG-2013), resulting in a value of 3.83%, likewise, the incidence in the design of rigid pavements of a subbase of 10 cm in thickness treated with 3.83% of cement with respect to the incidence in the design of a subbase of 20 cm was studied thickness of natural soil, resulting in a reduction of slab thickness from 3.91 cm to 2.3 cm for traffic from 150,000 ESALs to 7'500,000 ESALs respectively. To this end, material characterization, compaction and resistance tests were carried out, to determine the combined reaction module, which intervened in the design of the rigid pavement.

The minimum content of cement, 3.83%, was determined by compression break of specimens made with 2, 4 and 6% cement, to 7 days of wet curing, obtaining results of 11.7, 22.0 and 33.9 kg/cm<sup>2</sup> respectively, then, the sensitivity for humidity and density of compaction of the mixture was analyzed, obtaining values of 18.1, 22.0 and 20.6 kg/cm<sup>2</sup> in specimens made with -1, +0 and +1% of humidity with respect to the optimum and values of 11.8, 16.2 and 21.5 kg/cm<sup>2</sup> in specimens made at 95, 97 and 100% of the maximum dry density. With this, it was proved that the compressive strength is not less than 18 kg/cm<sup>2</sup> for the design conditions ( $\pm$  1% humidity and 100% of the maximum dry density).

Samples of natural soil and samples added with 3.83% cement, with 7 days of wet curing, reached CBR values of 20.34% and 293.03% respectively. With which, the resilient modulus of natural soil was determined by means of a correlation based on the CBR, obtaining a value of 123.07 MPa (17.849.20 psi). The resilient modulus of the soil cement was determined based on the speed of wave propagation in specimens with 3.83% cement, compacted under optimal conditions and with 7 days of wet curing, obtaining a value of 4,481.24 MPa (649.925.37 psi) for speeds of longitudinal and transversal wave of 1,538.97 and 888.52 m/s respectively. Then, with the values of resilient modulus, combined reaction modules of 12.13 MPa/m were calculated for the subbase of natural soil and 86.66 MPa/m for the subbase treated with minimum amount of cement.

**KEYWORDS:** Subbase, pavement design, resistance, cement, sensitivity analysis.



## Introducción

Con la finalidad de lograr un mejor desempeño y obtener mejores alternativas en la construcción de pavimentos, se han desarrollado distintos métodos que utilizan insumos producidos industrialmente, para mejorar las propiedades de los materiales usados en la construcción de estos pavimentos.

Uno de estos métodos es el tratamiento con cemento que se aplica a las distintas capas estructurales de un pavimento, el cual, consiste en la obtención de una mezcla seca de suelo, cemento y agua que luego de ser compactada, y con el transcurso del tiempo, presenta mejoras sustanciales en las propiedades del suelo.

La efectividad de este método ha sido comprobada en distintos países de Europa, América y de todo el mundo como EEUU, España, Francia, Inglaterra, Canadá, El Salvador, Ecuador, Colombia, Chile, entre otros. Por ello, han implementado normas, leyes y manuales que aseguran su adecuada aplicación. Para el caso de Perú, no se han implementado normas, leyes o manuales, concordes a la realidad, debido a que se cuenta con muy poco conocimiento respecto al tema, y muchas veces no es aplicado de la manera correcta.

Por otro lado, el sustancial crecimiento del tráfico vehicular, durante los últimos años, ha generado la necesidad de construir pavimentos que sirvan como vías de conexión a nivel nacional, regional y vecinal, y que soporten, de manera eficiente, la carga causada por el tránsito de los distintos tipos de vehículos, cada vez más pesados.

Por este motivo, esta investigación busca estudiar el incremento de las propiedades de un suelo, en este caso el de la cantera de Quillahuata, al ser tratado con cemento y su influencia en el diseño de pavimentos rígidos, reduciendo el espesor de losa necesario para determinados tráfico, a pesar de reducir el espesor de la subbase a la mitad.

Para llevar a cabo este trabajo se ha realizado la recopilación de bibliografía confiable, se probaron muestras de suelo natural y de suelo cemento mediante ensayos de caracterización, compactación y resistencia de suelos y se realizaron cálculos y diseños, con la finalidad de comparar el diseño, método AASHTO 93, de un pavimento rígido de subbase tratada con mínima cantidad de cemento y una sin tratar; utilizando material de la cantera de Quillahuata y aplicado a tráfico variado. Para esto, fue necesario proveer de un ambiente adecuado para



realizar los ensayos mediante la construcción de una cámara húmeda que permite curar los especímenes de suelo cemento en condiciones adecuadas.

La organización de la investigación está basada según la propuesta por la Universidad Andina del Cusco como se señala a continuación:

- Capítulo 1 – Planteamiento del Problema: El cual, trata sobre la descripción del problema, la formulación interrogativa del problema, la justificación, las limitaciones y los objetivos.
- Capítulo 2 – Marco Teórico: En el cual, se habla de los antecedentes de la tesis y los aspectos teóricos pertinentes, y se mencionan las hipótesis y la definición de variables.
- Capítulo 3 – Metodología: Donde se describe la metodología de la investigación y el diseño de la investigación, se define la población y muestra, se mencionan los instrumentos utilizados y se menciona el procedimiento de recolección de los datos y su análisis.
- Capítulo 4 – Resultados: Donde se muestran los principales resultados que se obtuvieron de la investigación.
- Capítulo 5 – Discusión: En el cual se discute sobre los resultados, su implicancia y sobre las limitaciones que se presentaron durante la investigación.
- Glosario: Trata del glosario de términos utilizados en la investigación y las abreviaturas que se utilizaron.
- Conclusiones: Donde se mencionan las conclusiones a las que se llega con la investigación en función de las hipótesis planteadas.
- Recomendaciones: En el cual, se brindan recomendaciones en función de los resultados alcanzados en la investigación.
- Referencias: El cual, contiene un listado de las referencias bibliográficas utilizadas en el desarrollo de la investigación.
- Anexos: Donde se encuentra la matriz de consistencia de la investigación, el registro fotográfico, la recolección de datos y los cálculos de los ensayos, el procesamiento de ondas y los diseños de pavimento rígido.
- Apéndices: En el cual, se encuentran la definición completa del suelo según la clasificación SUCS y la carta geológica del cuadrángulo de Cusco.





## Índice general

Dedicatoria .....	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen .....	iv
Abstract.....	v
Introducción.....	vi
Índice general .....	viii
Índice de figuras .....	xiii
Índice de tablas .....	xviii
Capítulo I: Planteamiento del problema.....	1
1.1. Identificación del problema.....	1
1.1.1. Descripción del problema.....	1
1.1.2. Formulación interrogativa del problema .....	2
1.2. Justificación e importancia de la investigación .....	3
1.2.1. Justificación técnica .....	3
1.2.2. Justificación social .....	3
1.2.3. Justificación por viabilidad .....	3
1.2.4. Justificación por relevancia .....	3
1.3. Limitaciones de la investigación .....	4
1.3.1. Limitación territorial .....	4
1.3.2. Limitaciones de materiales.....	4
1.3.3. Limitaciones de ensayo .....	4
1.3.4. Limitaciones de diseño de la mezcla de suelo cemento .....	5
1.3.5. Limitaciones de diseño del pavimento .....	5
1.3.6. Limitación de normativa .....	5
1.3.7. Limitación de equipos .....	6



1.4. Objetivo de la investigación ..... 6

1.4.1. Objetivo general ..... 6

1.4.2. Objetivos específicos..... 6

**Capítulo II: Marco teórico..... 7**

2.1. Antecedentes de la tesis o investigación actual..... 7

2.1.1. Antecedentes a nivel nacional ..... 7

2.1.2. Antecedentes a nivel internacional..... 7

2.2. Aspectos teóricos pertinentes ..... 9

2.2.1. Pavimento..... 9

2.2.2. Metodología de diseño AASHTO 93 para pavimento rígido..... 12

2.2.3. Estabilización de suelos ..... 24

2.2.4. Suelo tratado con cemento ..... 24

2.2.5. Método de dosificación por compactación y resistencia..... 41

2.2.6. Ensayos para caracterización del suelo ..... 45

2.2.7. Ensayos en suelos tratados con cemento ..... 52

2.3. Hipótesis..... 53

2.3.1. Hipótesis general ..... 53

2.3.2. Sub hipótesis ..... 53

2.4. Definición de variables..... 54

2.4.1. Variables independientes..... 54

2.4.2. Variables intervinientes ..... 55

2.4.3. Variables dependientes..... 56

2.4.4. Cuadro de operacionalización de variables ..... 57

**Capítulo III: Metodología..... 58**

3.1. Metodología de la investigación..... 58

3.1.1. Tipo de investigación ..... 58

3.1.2. Nivel de investigación ..... 58



3.1.3. Método de investigación .....	58
3.2. Diseño de la investigación.....	58
3.2.1. Diseño metodológico.....	58
3.2.2. Diseño de ingeniería.....	59
3.3. Población y muestra .....	60
3.3.1. Población.....	60
3.3.2. Muestra.....	60
3.3.3. Criterios de inclusión .....	62
3.4. Instrumentos .....	62
3.4.1. Instrumentos metodológicos .....	62
3.4.2. Instrumentos de ingeniería .....	63
3.5. Procedimientos de recolección de datos.....	66
3.5.1. Caracterización del material.....	66
3.5.2. Selección de mínima cantidad de cemento.....	71
3.5.3. Análisis de sensibilidad de la mezcla de suelo cemento .....	76
3.5.4. Valor relativo de soporte .....	79
3.5.5. Método del ultrasonido.....	81
3.5.6. Diseño del pavimento.....	83
3.6. Procedimientos de análisis de datos .....	84
3.6.1. Caracterización del material.....	84
3.6.2. Selección de mínima cantidad de cemento.....	92
3.6.3. Análisis de sensibilidad de la mezcla de suelo cemento .....	99
3.6.4. Valor relativo de soporte .....	104
3.6.5. Método del ultrasonido.....	109
3.6.6. Diseño del pavimento.....	113
<b>Capítulo IV: Resultados .....</b>	<b>121</b>
4.1. Clasificación del suelo.....	121



4.2. Ensayos de compactación..... 122

4.3. Resistencia a compresión ..... 123

4.4. Mínima cantidad de cemento..... 123

4.5. CBR..... 125

4.6. Velocidad de propagación de onda ..... 126

4.7. Módulo resiliente..... 127

4.8. Módulo de reacción combinado ..... 127

4.9. Espesor de losa en función del tráfico ..... 127

Capítulo V: Discusión ..... 131

5.1. Principales hallazgos a partir de los resultados obtenidos..... 131

5.2. Limitantes y dificultades de la investigación ..... 132

5.3. Relación de los resultados con las conclusiones de otras investigaciones ..... 133

5.4. Implicaciones de los resultados obtenidos ..... 134

Glosario ..... 136

Conclusiones ..... 140

Recomendaciones..... 143

Referencias ..... 144

Anexos ..... 148

Anexo 1 – Matriz de consistencia ..... 148

Anexo 2 – Registro fotográfico ..... 149

Anexo 3 – Hojas de cálculo del ensayo de análisis granulométrico ..... 160

Anexo 4 – Hoja de cálculo de volúmenes de moldes utilizados ..... 161

Anexo 5 – Hojas de cálculo del ensayo Proctor Modificado ..... 162

Anexo 6 – Hojas de cálculo del ensayo relación humedad-densidad (suelo cemento – 2%) 164

Anexo 7 – Hojas de cálculo del ensayo relación humedad-densidad (suelo cemento – 4%) 166

Anexo 8 – Hojas de cálculo del ensayo relación humedad-densidad (suelo cemento – 6%) 168



Anexo 9 – Hoja de cálculo de la elaboración de testigos de suelo cemento para determinar el mínimo contenido de cemento ..... 170

Anexo 10 – Hoja de cálculo del ensayo de resistencia a la compresión de testigos de suelo cemento para determinar el mínimo contenido de cemento ..... 171

Anexo 11 – Hoja de cálculo de la elaboración de testigos de suelo cemento para análisis de sensibilidad por humedad de compactación ..... 172

Anexo 12 – Hojas de cálculo del ensayo de resistencia a la compresión de testigos de suelo cemento para análisis de sensibilidad por humedad de compactación ..... 173

Anexo 13 – Hoja de cálculo de la variación de la densidad respecto al número de golpes por capa ..... 174

Anexo 14 – Hoja de cálculo de la elaboración de testigos de suelo cemento para análisis de sensibilidad por densidad de compactación ..... 175

Anexo 15 – Hoja de cálculo del ensayo de resistencia a la compresión de testigos de suelo cemento para análisis de sensibilidad por densidad de compactación ..... 176

Anexo 16 – Hojas de cálculo del ensayo de CBR (suelo natural) ..... 177

Anexo 17 – Hojas de cálculo del ensayo de CBR (suelo cemento) ..... 180

Anexo 18 – Hoja de cálculo de la elaboración de testigos de suelo cemento para ensayo de velocidad de pulso ultrasónico ..... 183

Anexo 19 – Señales de onda visualizadas con el software PL-Link ..... 184

Anexo 20 – Procesamiento de ondas ..... 185

Anexo 21 – Diseños de pavimentos (análisis de sensibilidad del espesor de losa en función del tráfico) ..... 191

Apéndices ..... 198

Apéndice A - Esquema para establecer la descripción del suelo en el sistema SUCS ..... 198

Apéndice B – Mapa geológico del cuadrángulo del cusco, hoja 28-s-IV (parte superior) .... 199

Apéndice C – Mapa geológico del cuadrángulo del cusco, hoja 28-s-IV y su leyenda (zona de interés) ..... 200

## Índice de figuras

Figura 1 - Falla por inadecuado soporte de base en el pavimento de la Av. 28 de Julio .....	1
Figura 2 - Ubicación geográfica de la provincia del Cusco y mapa del Cusco.....	4
Figura 3 - Ejemplo de la distribución de las cargas a nivel de subbase en un pavimento de concreto (izquierda) y un pavimento flexible (derecha) .....	10
Figura 4 - Corte transversal de un pavimento rígido.....	10
Figura 5 - Curva típica de compactación de suelos.....	18
Figura 6 – Efecto de la energía de compactación en el peso volumétrico seco .....	19
Figura 7 – Representación de la prueba de compactación Proctor Modificado y Estándar.....	19
Figura 8 – Ábaco para la determinación del módulo de reacción compuesto de la subrasante, $k_{\infty}$ , asumiendo un espesor semi-infinito de subrasante. ....	21
Figura 9 - Nomograma para determinar el módulo de reacción en función de la profundidad del lecho rocoso.....	22
Figura 10 – Corrección del módulo efectivo de la reacción de la subrasante por potencial de pérdida de soporte de la subbase .....	23
Figura 11 - Curvas de gradación según el tipo de suelo.....	26
Figura 12 - Clasificación de los materiales tratados con cemento .....	26
Figura 13 - Distribución de esfuerzos para capas de suelo cemento y estabilizado granular ..	28
Figura 14 - Relación entre el porcentaje de paso del tamiz N° 4 y la resistencia a la compresión. ....	29
Figura 15 - Relación entre la resistencia a la compresión y la densidad.....	30
Figura 16 - Variación de la resistencia a compresión con la densidad de compactación .....	30
Figura 17 - Curvas típicas que muestran la variación de la resistencia a la compresión simple con el contenido.....	31
Figura 18 - Variación de la resistencia a compresión simple con el tiempo .....	31
Figura 19 - Ganancia de resistencia a compresión a largo plazo .....	32
Figura 20 - Influencia del contenido de humedad en la resistencia .....	32
Figura 21 – Resistencia a flexotracción en función de la resistencia a compresión .....	33
Figura 22 - Módulo de elasticidad (dinámico) en función de la resistencia a compresión .....	34
Figura 23 - Tipos de medición de velocidad de pulso ultrasónico.....	36
Figura 24 - Ondas longitudinales .....	37
Figura 25 - Ondas transversales .....	37
Figura 26 - Funcionamiento del equipo de pulso ultrasónico .....	38



Figura 27 - Equipo de pulso ultrasónico Pundit PL-200..... 38

Figura 28 - Relación entre los dominios temporal y frecuencial ..... 39

Figura 29 - Tipos de filtros..... 40

Figura 30 - Determinación del contenido de cemento para suelocemento (resistencia a compresión a 7 días  $\geq 2,5$  MPa y  $\leq 4,5$  MPa). Se ha escogido el porcentaje de cemento que proporcione una resistencia un 20% superior a la mínima especificada (3,0 MPa)..... 43

Figura 31 - Variación de la resistencia a compresión con la densidad de compactación ..... 44

Figura 32 - Variación de la resistencia a compresión con la humedad de compactación ..... 44

Figura 33 - Determinación del plazo de trabajabilidad de una mezcla con cemento..... 45

Figura 34 - Carta de Plasticidad ..... 49

Figura 35 – Diseño de ingeniería ..... 59

Figura 36 – Cantera de Quillahuata “a)” y su vista aérea “b)” ..... 66

Figura 37 – a) Tamizado manual de la muestra y b) Porciones de las muestras retenidas en el tamizado ..... 67

Figura 38 – a) División de la muestra colocada con ayuda del acanalador y b) Muestras del ensayo para determinar sus contenidos de humedad..... 68

Figura 39 – a) Elaboración de cilindros de 3.2 mm de diámetro verificando su desmoronamiento y b) Muestras del ensayo para determinar sus contenidos de humedad ..... 68

Figura 40 – a) Rellenado, con material fino, luego del enrasado del espécimen compactado y b) Pesado de cada espécimen compactado de la muestra PM – 03 ..... 69

Figura 41 – Lavado y saturado del agregado pasante el tamiz de  $\frac{3}{4}$ ” y retenido en el tamiz N°4 ..... 70

Figura 42 – Toma de muestras de material fino secado al aire para determinar su contenido de humedad higroscópica ..... 70

Figura 43 – a) Secado al aire del material disgregado pasante del tamiz de  $\frac{3}{4}$ ” y b) Saturado del agregado lavado pasante del tamiz de  $\frac{3}{4}$ ” y retenido en el tamiz N°4 ..... 71

Figura 44 – a) Compactado del espécimen con energía equivalente a la de Proctor Modificado y b) Extracción de porción de suelo compactado para determinar el contenido de humedad ..... 72

Figura 45 – Cámara húmeda ..... 73

Figura 46 – a) Espacio donde se ubica la resistencia eléctrica, bolla y el humidificador y b) Instalación del sensor de humedad y temperatura..... 74



Figura 47 – a) Mezclado energético para una homogenizar y distribuir de manera adecuada la humedad en la mezcla y b) Extracción del testigo elaborado. .... 75

Figura 48 – a) Curado de testigos de suelo-cemento y b) Testigos de suelo-cemento con 2%, 4% y 6% de cemento ensayados a compresión. .... 76

Figura 49 – a) Materiales utilizados en la elaboración de testigos de suelo-cemento (agregado grueso en estado saturado superficialmente seco, material fino secado al aire, cemento y agua) y b) Engrasado del molde antes de la compactación para facilitar la extracción del testigo ..... 77

Figura 50 – a) Saturación de los testigos de suelo-cemento luego de ser retirados de la cámara húmeda y b) Compresión de testigos de suelo-cemento luego de ser saturados por 3 hrs ..... 78

Figura 51 – a) Lectura de deformaciones de los especímenes de suelo natural bajo condiciones de saturación y b) Penetración del espécimen de suelo natural ..... 80

Figura 52 – a) Curado de especímenes de suelo-cemento para el ensayo de CBR y b) Extracción de muestra alrededor de la zona de penetración del pistón para determinar su contenido de humedad..... 81

Figura 53 – a) Colocado de agente de acoplamiento (gel para ecografías) y b) Lectura de la transmisión de la onda longitudinal a una frecuencia de 54 kHz ..... 82

Figura 54 – Esquema del procedimiento para el procesamiento de señales de onda..... 83

Figura 55 - Curvas granulométricas ..... 84

Figura 56 – Gráfica para determinar el límite líquido..... 85

Figura 57 – Contenidos de humedad del ensayo de límite plástico ..... 86

Figura 58 – Clasificación del material fino del suelo (Carta de plasticidad) ..... 87

Figura 59 - Curva de compactación de la muestra PM – 4 ..... 89

Figura 60 - Curvas de compactación de las muestras de suelo natural ..... 90

Figura 61 - Curva de compactación de la muestra de suelo-cemento RHD – 2 – 2 ..... 93

Figura 62 – Curvas de compactación de las muestras de suelo cemento adicionadas con 2% de cemento ..... 94

Figura 63 – Curvas de compactación de las muestras de suelo cemento adicionadas con 4% de cemento ..... 94

Figura 64 – Curvas de compactación de las muestras de suelo-cemento adicionadas con 6% de cemento ..... 95

Figura 65 - Contenidos de humedad y densidades secas de testigos elaborados con 2%, 4% y 6% de cemento ..... 97





Figura 66 - Determinación del mínimo contenido de cemento para suelo cemento (resistencia a compresión a 7 días  $\geq 18 \text{ kg/cm}^2$ ). Se ha escogido el porcentaje de cemento que proporcione una resistencia un 20% superior a la mínima ( $21.6 \text{ kg/cm}^2$ )..... 99

Figura 67 – Contenidos de humedad de testigos se suelo cemento elaborados para el análisis de sensibilidad por humedad de compactación, con humedades de -1%, +0% y +1% respecto a la óptima. .... 100

Figura 68 – Determinación del número de golpes por capa necesarios para alcanzar densidades secas del 95% y del 97% de la máxima (2.043 y 2.086) en una mezcla de suelo-cemento con 3.83% de cemento ..... 101

Figura 69 – Densidades secas de testigos de suelo-cemento elaborados al 100%, 97% y 95% de la máxima; para el análisis de sensibilidad por densidad de compactación..... 101

Figura 70 - Variación de la resistencia a compresión en función de la humedad de compactación para un suelo-cemento con 3.83% de cemento y energía de compactación de Proctor Modificado ..... 103

Figura 71 - Variación de la resistencia a compresión en función de la densidad de compactación para un suelo-cemento con 3.83% de cemento y energía de compactación de Proctor Modificado ..... 104

Figura 72 – Gráfica de curvas de esfuerzo en función de la penetración de los especímenes (56, 25 y 12 golpes) de la muestra CBR – SN – 01 ..... 106

Figura 73 – Gráfica del CBR en función de la densidad seca de la muestra CBR – SN – 01 106

Figura 74 – Curvas de CBR en función de la densidad seca de las muestras de suelo natural ..... 107

Figura 75 - Gráfica de curvas de esfuerzo en función de la penetración de los especímenes (56, 25 y 12 golpes) de la muestra CBR – SC – 02 ..... 108

Figura 76 - Gráfica del CBR en función de la densidad seca de la muestra CBR – SC – 02 108

Figura 77 - Gráfica de las curvas de CBR en función de la densidad seca de las muestras de suelo cemento (con 3.83% de cemento)..... 109

Figura 78 - Humedad y densidad seca de testigos de suelo cemento elaborados con 3.83% de cemento y bajo condiciones de compactación óptimas para ensayo de ultrasonido ..... 109

Figura 79 – Señales de onda visualizadas con el software PL-Link ..... 111

Figura 80 – Procesamiento de la señal de onda del espécimen TSC – VU – 02: a) señal de onda, b) señal de onda filtrada, c) espectro de la señal de onda, d) señal de onda filtrada y e) envolvente de la señal de onda filtrada y su tiempo de vuelo ..... 112



Figura 81 – Precipitaciones mensuales basadas en datos históricos de la estación: Granja Kcayra ..... 116

Figura 82 – Espesores de losa en función del tráfico resultantes del análisis de sensibilidad 118

Figura 83 - Tráficos en función del espesor de losa resultantes del análisis de sensibilidad. 119

Figura 84 – Resultados del ensayo de análisis granulométrico utilizados en la clasificación del suelo..... 121

Figura 85 – Resultados de los ensayos de límite líquido y límite plástico utilizados en la clasificación del suelo ..... 121

Figura 86 – Curvas de compactación del suelo natural y del adicionado con 2%, 4% y 6% de cemento ..... 122

Figura 87 – Gráfica de resultados de resistencia a la compresión en función del contenido de cemento de testigos de suelo cemento con 2%, 4% y 6% (a 7 días de curado húmedo)..... 123

Figura 88 – Resultado de la mínima cantidad de cemento necesaria para alcanzar la mínima resistencia requerida por la EG – 2013 (18 kg/cm<sup>2</sup>) excedida en 20% (21 kg/cm<sup>2</sup>) ..... 124

Figura 89 – Resultado del análisis de sensibilidad por humedad de compactación..... 124

Figura 90 – Resultado del análisis de sensibilidad por densidad de compactación ..... 125

Figura 91 – Resultados de valores de CBR promedio para muestras de suelo natural y suelo cemento ..... 125

Figura 92 – Resultado de tiempos de vuelo de onda de ultrasonido en testigos de suelo cemento ..... 126

Figura 93 – Diferencias de espesor de losa en función del tráfico, resultantes del análisis de sensibilidad..... 128

Figura 94 – Gráfica de espesor de losa en función del tráfico ..... 129

Figura 95 – Gráfica de tráfico en función del espesor de losa ..... 130



### Índice de tablas

Tabla 1 - Categorías de sub rasante..... 12

Tabla 2 - Número de repeticiones acumuladas de ejes equivalentes de 8.2 t (EE), en el carril de diseño (MTC, 2014) ..... 14

Tabla 3 - Índice de serviciabilidad inicial (p0), índice de serviciabilidad final (pt) y diferencial de serviciabilidad ( $\Delta$ PSI) según rango de tráfico (MTC, 2014)..... 14

Tabla 4 - Valores recomendados de nivel de confiabilidad (R) y desviación estándar normal ( $Z_r$ ) según tipo de tráfico ..... 15

Tabla 5 - Relación entre el tiempo de remoción del agua y la calidad del drenaje ..... 16

Tabla 6 - Valores recomendados del Coeficiente de Drenaje, Cd, para el diseño de pavimentos rígidos ..... 17

Tabla 7 - Coeficiente de transferencia de carga ..... 17

Tabla 8 - Valores de carga unitaria patrón para determinar el CBR ..... 20

Tabla 9 – Valores típicos de CBR según el tipo de suelo ..... 20

Tabla 10 – Valores típicos del factor de pérdida de soporte (LS) ..... 23

Tabla 11 – Requerimientos mínimos para la evaluación de la resistencia a compresión exigidas en varios países..... 29

Tabla 12 - Valores de CBR y resistencia a compresión en mezclas de suelo cemento ..... 33

Tabla 13 - Rangos típicos de coeficiente de Poisson ..... 34

Tabla 14 – Propiedades típicas de una material tratado con cemento..... 35

Tabla 15 - Relación entre medidas de velocidad longitudinal y la calidad del concreto ..... 36

Tabla 16 - Relaciones entre velocidades de propagación y las combinaciones de pares de constantes elásticas más usuales..... 41

Tabla 17 – Ecuaciones de las constantes elásticas a partir de medidas de velocidad ..... 41

Tabla 18 - Serie de tamices alternativos para una gradación de separación uniforme entre los puntos de su gráfica..... 46

Tabla 19 - Peso mínimo de la muestra según el tamaño máximo de sus partículas..... 46

Tabla 20 - Suelos finos: 50% o más pasa el tamiz de 75  $\mu$ m (N° 200) y límite líquido < 50% ..... 47

Tabla 21 - Suelos finos: 50% o más pasa el tamiz de 75  $\mu$ m (N° 200) y límite líquido  $\geq$  50% ..... 48

Tabla 22 - Gravas Más del 50% de la fracción mayor al tamiz de 75  $\mu$ m (N° 200) queda retenida en el tamiz de 4.75 mm (N° 4) ..... 48



Tabla 23 - Arena: 50% o más de la fracción mayor al tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (N° 200) pasa el tamiz de 4.75 mm (N° 4)..... 48

Tabla 24 - Sistema de clasificación AASHTO suelos granulares ..... 50

Tabla 25 – Sistema de clasificación AASHTO suelos finos ..... 50

Tabla 26 – Métodos de compactación de suelos en laboratorio Proctor Modificado ..... 50

Tabla 27 - Penetraciones para lecturas de carga ..... 51

Tabla 28 - Peso mínimo de la muestra de ensayo para determinar su absorción (MTC, 2016) ..... 51

Tabla 29 – Cuadro de Operacionalización de Variables ..... 57

Tabla 30 - Cantidad de muestras estudiadas ..... 61

Tabla 31 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de análisis granulométrico..... 63

Tabla 32 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite plástico ..... 63

Tabla 33 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de límite líquido ..... 63

Tabla 34 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de absorción de agregados..... 63

Tabla 35 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de humedad higroscópica ..... 64

Tabla 36 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de proctor modificado ..... 64

Tabla 37 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de CBR de suelo natural ..... 64

Tabla 38 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de relación humedad-densidad (suelo cemento) ..... 64

Tabla 39 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de preparación de testigos de suelo cemento ..... 65

Tabla 40 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de resistencia a la compresión de testigos de suelo cemento ..... 65

Tabla 41 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de CBR de suelo cemento ..... 65

Tabla 42 - Instrumentos de ingeniería para el ensayo de velocidad de pulso ultrasónico ..... 66

Tabla 43 - Grupos de material usados para ensayos de suelo cemento..... 70

Tabla 44 - Cálculo de pesos para el ensayo Relación Humedad-Densidad (Suelo Cemento). 72

Tabla 45 - Cálculo de pesos para elaboración de testigos de suelo cemento (2%, 4% y 6%) . 75

Tabla 46 – Cálculo de los pesos de los materiales utilizados en la elaboración de testigos para el análisis de sensibilidad por humedad y densidad de compactación ..... 77

Tabla 47 – Contenido de humedad presente en el suelo para ensayo de CBR ..... 79

Tabla 48 – Cálculo de suelo y agua necesarios para especímenes de CBR (suelo natural)..... 79

Tabla 49 – Cálculo de suelo, cemento y agua necesarios para especímenes de CBR (suelo cemento) ..... 80



Tabla 50 – Calculo de agregado, suelo, cemento y agua necesarios para la elaboración de testigos de suelo cemento utilizados en el ensayo de velocidad de pulso de ultrasonido..... 81

Tabla 51 – Cálculos realizados con los % Retenidos promedios..... 84

Tabla 52 – Cálculos del ensayo de límite liquido ..... 85

Tabla 53 - Cálculos del ensayo de límite plástico..... 86

Tabla 54 - Cálculos para clasificar el suelo según el SUCS ..... 87

Tabla 55 – Clasificación del suelo según el SUCS ..... 87

Tabla 56 - Clasificación del material en estudio según la AASHTO..... 88

Tabla 57 – Cálculos para determinar la curva granulométrica de la muestra PM – 4 ..... 89

Tabla 58 – Contenidos de humedad óptimo y máximas densidades secas de los ensayos de compactación de las muestras de suelo natural ..... 90

Tabla 59 - Cálculos para determinar la absorción del agregado ..... 91

Tabla 60 – Cálculos para determinar la humedad higroscópica del material fino utilizado en el ensayo Relación Humedad-Densidad (Suelo Cemento) ..... 91

Tabla 61 - Cálculos para determinar la humedad higroscópica del material fino utilizado en la elaboración de testigos de suelo cemento para determinar la mínima cantidad de cemento ..... 91

Tabla 62 - Cálculos para determinar la humedad higroscópica del material fino utilizado en la elaboración de testigos de suelo cemento para analizar la sensibilidad por humedad de compactación..... 92

Tabla 63 - Cálculos para determinar la humedad higroscópica del material fino utilizado en la elaboración de testigos de suelo cemento para analizar la sensibilidad por densidad de compactación..... 92

Tabla 64 - Cálculos para determinar la humedad higroscópica del material fino utilizado en la elaboración de testigos de suelo cemento para determinar la velocidad de propagación de ondas ..... 92

Tabla 65 - Cálculos para determinar la curva granulométrica de la muestra RHD – 2 – 2 ..... 93

Tabla 66 - Contenidos de humedad óptimo y máximas densidades secas de los ensayos de compactación de las muestras de suelo cemento adicionadas con 2% de cemento ..... 94

Tabla 67 – Contenidos de humedad óptimo y máximas densidades secas de los ensayos de compactación de las muestras de suelo-cemento adicionadas con 4% de cemento ..... 95



Tabla 68 – Contenidos de humedad óptimo y máximas densidades secas de los ensayos de compactación de las muestras de suelo-cemento adicionadas con 6% de cemento ..... 95

Tabla 69 – Cálculos de la elaboración de testigos con 2% de cemento ..... 96

Tabla 70 – Valores de densidad seca y contenido de humedad de testigos elaborados con 2%, 4% y 6% de cemento ..... 97

Tabla 71 – Cálculos para determinar la resistencia a compresión de testigos elaborados con 4% de cemento..... 98

Tabla 72 – Valores de resistencia a la compresión de testigos elaborados con 2%, 4% y 6% de cemento a 7 días de curado húmedo..... 98

Tabla 73 – Determinación de la humedad óptima y la máxima densidad seca para un suelo-cemento con 3.83% de cemento ..... 99

Tabla 74 - Contenidos de humedad de los testigos de suelo-cemento elaborados para el análisis de sensibilidad por humedad de compactación ..... 100

Tabla 75 – Densidades secas de testigos de suelo cemento elaborados para el análisis de sensibilidad por densidad de compactación ..... 102

Tabla 76 - Valores de resistencia a la compresión de testigos elaborados (a 7 días de curado húmedo) para el análisis de sensibilidad por humedad de compactación ..... 102

Tabla 77 - Valores de resistencia a la compresión de testigos elaborados (a 7 días de curado húmedo) para el análisis de sensibilidad por densidad de compactación..... 103

Tabla 78 – Resultados de los ensayos de CBR para muestras de suelo natural..... 107

Tabla 79 - Resultados de los ensayos de CBR para muestras de suelo cemento ..... 108

Tabla 80 – Humedad y densidad seca de testigos de suelo cemento elaborados para ensayo de pulso de ultrasonido..... 110

Tabla 81 – Densidades de testigos elaborados para ensayo de pulso de ultrasonido..... 110

Tabla 82 – Tiempos de vuelo del pulso ultrasónico en testigos de suelo-cemento..... 112

Tabla 83- Valores de desviación estándar normal ( $Z_r$ ) utilizados en los diseños ..... 115

Tabla 84 – Valores de índice de serviciabilidad final ( $p_t$ ) y diferencial de serviciabilidad ( $\Delta p_s$ ) utilizados en los diseños ..... 115

Tabla 85 - Resumen de espesores de losa requeridos según el tráfico, para subbase de suelo natural y de suelo cemento ..... 118

Tabla 86 – Tráfico que puede soportar un pavimento con subbase de suelo natural y con subbase de cemento, variando el espesor de losa..... 119



Tabla 87 – Resultados de los ensayos de compactación para el suelo natural y el adicionado con cemento ..... 122

Tabla 88 – Resultados de resistencia a la compresión de testigos de suelo cemento con 2%, 4% y 6% de cemento (a 7 días de curado húmedo). ..... 123

Tabla 89 - Resultado de tiempos de vuelo de onda de ultrasonido en testigos de suelo cemento ..... 126

Tabla 90 – Resultado de velocidad de propagación de onda longitudinal y transversal..... 126

Tabla 91 – Resultados de módulo resiliente para el suelo natural y el tratado con cemento (3.83% de cemento)..... 127

Tabla 92 – Resultados de módulo de reacción combinado del suelo natural y del tratado con cemento (3.83% de cemento) ..... 127

Tabla 93 –Resumen de resultados de los diseños de espesores de losa requeridos en función del tráfico..... 128

Tabla 94 - Porcentajes de cemento requeridos para distintos tipos de suelo (PCA) ..... 133



## Capítulo I: Planteamiento del problema

### 1.1. Identificación del problema

#### 1.1.1. Descripción del problema

El desarrollo de Perú genera la necesidad de ejecutar proyectos de pavimentación, con la finalidad de que sirvan de vías de interconexión entre las distintas localidades de las regiones del país. Pero debido a varios factores, como por ejemplo:

- la variedad de climas que presenta el Perú,
- las mayores exigencias a las que se someten los pavimentos,
- continuo incremento del tráfico vehicular,
- alto consumo de materiales de cantera utilizados en su construcción,
- que los materiales de cantera muchas veces no cumplen con las características exigidas por las normas,
- la contaminación al medio ambiente provocada al ejecutar los proyectos, entre otros.

Los proyectos de pavimentación tienen que:

- presentar mayor resistencia a los efectos del intemperismo,
- presentar mayor resistencia para soportar las aplicaciones de las cargas del tráfico,
- buscar reducir el consumo de materiales en la construcción,
- mejorar las propiedades de los materiales utilizados en la construcción,
- reducir las explotaciones de canteras,
- ejecutarse bajo diseños que aseguren el adecuado comportamiento de las capas estructurales que componen un pavimento,
- optimizar los recursos económicos invertidos.

Esto por medio del estudio y de la aplicación de nuevas tecnologías que ayuden a mejorar las propiedades de las capas que componen un pavimento, como lo es el tratamiento con cemento.



Figura 1 - Falla por inadecuado soporte de base en el pavimento de la Av. 28 de Julio





## 1.1.2. Formulación interrogativa del problema

### 1.1.2.1. Formulación interrogativa del problema general

¿Cómo varía el diseño, método AASHTO (93), de un pavimento rígido de subbase tratada con mínima cantidad de cemento y una sin tratar, utilizando material de la cantera de Quillahuata y aplicado a tráfico variado?

### 1.1.2.2. Formulación interrogativa de los problemas específicos

**Problema específico N° 1:** ¿Cómo se clasifica el suelo según el SUCS y la AASHTO?

**Problema específico N° 2:** ¿Cuáles son los porcentajes de humedad óptima y las máximas densidades secas del suelo natural y los adicionandos con 2%, 4% y 6% de cemento, mediante ensayos de compactación con energía modificada?

**Problema específico N° 3:** ¿Cuáles son los valores de resistencia a compresión de testigos de suelo-cemento elaborados con 2%, 4% y 6% de cemento, según MTC E 1103?

**Problema específico N° 4:** ¿Cuál es la mínima cantidad de cemento a añadirse para alcanzar una resistencia a la compresión de 18 kg/cm<sup>2</sup>, según el método de dosificación por compactación y resistencia?

**Problema específico N° 5:** ¿Cuáles son los valores de CBR para el suelo sin tratar y el tratado con mínima cantidad de cemento?

**Problema específico N° 6:** ¿Cuáles son los valores de módulo resiliente para el suelo sin tratar y el tratado con mínima cantidad de cemento?

**Problema específico N° 7:** ¿Cuáles son los valores de módulo de reacción combinado para subbase de suelo sin tratar y tratado con la mínima cantidad de cemento, de  $e=20$  cm y 10 cm respectivamente, y sobre una subrasante con 6% de CBR?

**Problema específico N° 8:** ¿Cuáles son los espesores de losa de concreto resultantes de diseños para tráfico de 150,000 de ESALs a 7,500,000 de ESALs y con los valores de módulo de reacción combinado determinados, método AASHTO (93)?



## **1.2. Justificación e importancia de la investigación**

### **1.2.1. Justificación técnica**

Tratar el suelo de subbase con cemento mejora considerablemente sus propiedades, colocándolo muy por encima de uno sin tratar, dándole la capacidad de brindar mayor aporte en la estructura del pavimento, lo cual, se ve reflejado en mayores módulos de reacción de las capas de apoyo; por ende, una reducción en los espesores de las distintas capas estructurales de un pavimento. Además, posee una mejor resistencia a efectos del agua, distribuye mejor la carga vehicular al nivel de fundación y puede ser utilizado en todos los tipos de suelos; otorgando una serie de beneficios a la estructura del pavimento, incluso para bajos contenidos de cemento, siempre y cuando, se realice de forma correcta.

### **1.2.2. Justificación social**

La investigación tiene una importancia social, debido, a que en la actualidad los proyectos de pavimentación generan una elevada explotación de materiales de cantera y que muchos de ellos no presentan un adecuado comportamiento en el tiempo. Por lo cual, la presente investigación brinda conocimientos y resultados de laboratorio capaces de ser utilizados en el diseño de pavimentos y sirve como base de futuras investigaciones. También proporciona una alternativa para reducir la explotación de canteras, nuevas o existentes, al ser una alternativa sostenible con el medio ambiente.

Además, los resultados de la investigación pueden ser utilizados para otros suelos de características similares.

### **1.2.3. Justificación por viabilidad**

El tratamiento de materiales con cemento es un método bastante estudiado, hace más de 50 años, y aplicado en diversos países del mundo como España, Inglaterra, Francia, El Salvador, Argentina, Colombia, Brasil, Chile, EEUU, Canadá, entre otros, por lo cual, se cuenta con un amplio sustento de estudios e investigaciones respecto al tema.

Con respecto a los ensayos de la investigación, la Universidad Andina del Cusco cuenta con los equipos necesarios para llevarlos a cabo, además, se cuenta con el permiso de la comunidad de Quillahuata para la extracción del suelo a ser utilizado en la investigación.

### **1.2.4. Justificación por relevancia**

En varios países como España, México, Colombo, Chile, entre otros, se ha comprobado la mejora de las propiedades que brinda tratar un material de subbase con cemento y su mayor

aporte en la estructura del pavimento, por ello, este método viene a ser una alternativa viable para satisfacer las necesidades técnicas, económicas y medio ambientales que genera un proyecto de pavimentación, aperturando la posibilidad de aplicación de nuevas tecnologías, en la construcción y en el diseño de pavimentos.

### 1.3. Limitaciones de la investigación

#### 1.3.1. Limitación territorial

La presente investigación se desarrolló en la región, departamento y provincia de Cusco que se encuentra a  $13^{\circ} 30' 45''$  latitud sur y a  $71^{\circ} 58' 33''$  longitud oeste, limitándose a este territorio los resultados obtenidos.

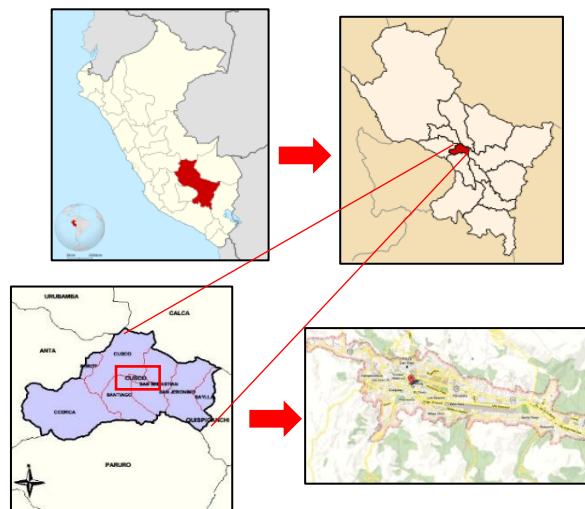


Figura 2 - Ubicación geográfica de la provincia del Cusco y mapa del Cusco

#### 1.3.2. Limitaciones de materiales

- Material lastre extraído de la cantera de Quillahuata.
- Cemento Yura Tipo IP.
- Agua potable de la Universidad Andina del Cusco.

#### 1.3.3. Limitaciones de ensayo

- Se limita a caracterizar el material lastre extraído de la cantera de Quillahuata según su granulometría, su límite líquido e índice de plasticidad.
- La energía de compactación del ensayo de Relaciones Densidad-Humedad (Suelo Cemento) es equivalente a la del ensayo Proctor Modificado.
- Se limita a la elaboración de testigos de suelo cemento de 4" de diámetro y 4.56" de altura.



#### 1.3.4. Limitaciones de diseño de la mezcla de suelo cemento

- Se utiliza el suelo sin modificar su granulometría.
- Ajuste de la composición granulométrica
- Elaboración de testigos, para determinar el contenido mínimo de cemento, al 100% de la máxima densidad seca del ensayo Relaciones Densidad-Humedad (Suelo Cemento).
- El diseño del mínimo contenido de cemento es para una resistencia a la compresión de  $18 \text{ kg/cm}^2$ , evaluado a 7 días de curado húmedo, al 100% de la máxima densidad seca del ensayo de compactación y para variaciones de  $\pm 1\%$  de humedad respecto a la óptima.
- El curado es a temperaturas de  $23^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$  y a humedad relativa  $> 96\%$ .
- Elaboración de testigos, para el análisis de sensibilidad por compactación, al 95%, 97% y 100% de la máxima densidad seca alcanzada en el ensayo de compactación.
- Elaboración de testigos, para el análisis de sensibilidad por contenido de humedad, a -1%, +0% y +1% del contenido de humedad óptimo del ensayo de compactación del suelo cemento.
- Se considera el plazo de trabajabilidad de la mezcla como adecuado.

#### 1.3.5. Limitaciones de diseño del pavimento

- Se consideran valores de desviación estándar normal ( $Z_r$ ) e índices de serviciabilidad inicial ( $p_0$ ) y final ( $p_f$ ) recomendados por el MTC, según el tráfico.
- Se limita a tráfico de 150,000 de ESALs a 7,500,000 de ESALs.
- Se limita a una losa de concreto de  $210 \text{ kg/cm}^2$ , sin refuerzo, con dispositivos de transferencia de carga y sin conexión a la berma.
- La calidad de drenaje de la subbase se considera regular.
- Se limita a diseños con espesores de base de 10 cm (4") y 20 cm (8") para el suelo natural y suelo tratado con cemento respectivamente.
- Se considera que la cimentación rígida se encuentra a más de 3 metros de profundidad.

#### 1.3.6. Limitación de normativa

- La dosificación del cemento se limita al método de dosificación de cemento por compactación y resistencia descrito en el Manual de Capas Tratadas con Cemento, del Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) y Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX) del Ministerio de Fomento (2003).



### 1.3.7. Limitación de equipos

- Aparatos y herramientas del Laboratorio de Suelos, Materiales, Concreto y Asfalto de la Escuela Profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Andina del Cusco.

## 1.4. Objetivo de la investigación

### 1.4.1. Objetivo general

Comparar el diseño, método AASHTO 93, de un pavimento rígido de subbase tratada con mínima cantidad de cemento y una sin tratar, utilizando material de la cantera de Quillahuata y aplicado a tráfico variado.

### 1.4.2. Objetivos específicos

**Objetivo específico N° 1:** Determinar la clasificación del suelo según el SUCS y la AASHTO.

**Objetivo específico N° 2:** Determinar los porcentajes de humedad óptima y las máximas densidades secas del suelo natural y los adicionandos con 2%, 4% y 6% de cemento, mediante ensayos de compactación con energía modificada.

**Objetivo específico N° 3:** Determinar los valores de resistencia a compresión de testigos de suelo cemento elaborados con 2%, 4% y 6% de cemento, según MTC E 1103.

**Objetivo específico N° 4:** Determinar la mínima cantidad de cemento a añadirse para alcanzar una resistencia a compresión de 18 kg/cm<sup>2</sup>, según el método de dosificación por compactación y resistencia.

**Objetivo específico N° 5:** Determinar los valores de CBR para el suelo sin tratar y el tratado con mínima cantidad de cemento.

**Objetivo específico N° 6:** Determinar los valores de módulo resiliente para el suelo sin tratar y el tratado con mínima cantidad de cemento.

**Objetivo específico N° 7:** Determinar los valores de módulo de reacción combinado para subbase de suelo sin tratar y tratado con la mínima cantidad de cemento, de  $e=20$  cm y 10 cm respectivamente, y sobre una subrasante con 6% de CBR.

**Objetivo específico N° 8:** Determinar los espesores de losa de concreto resultantes de diseños para tráfico de 150,000 de ESALs a 7,500,000 de ESALs y con los valores de módulo de reacción combinado determinados, método AASHTO (93).

## Capítulo II: Marco teórico

### 2.1. Antecedentes de la tesis o investigación actual

#### 2.1.1. Antecedentes a nivel nacional

No se encontraron estudios relacionados con el tema de investigación.

#### 2.1.2. Antecedentes a nivel internacional

**Pedro Antonio Serigos (2009, Universidad de Buenos Aires)** en el trabajo de investigación **“Rigidez a baja deformación de mezclas de suelo de la formación Pampeano y Cemento Portland”**, buscó evaluar los efectos de la estabilización de un suelo de la formación Pampeano, mediante la incorporación de cemento Portland. Para esto, realizó de una serie de ensayos en probetas moldeadas con la humedad óptima y la densidad seca máxima del suelo dosificadas con 4, 6, 8 y 10% de cemento a distintas edades. Los ensayos realizados fueron de caracterización de los materiales, de durabilidad de “congelamiento y deshielo” y “humedecimiento y secado”, de compresión simple y medición de velocidad de propagación de ondas.

En la investigación se concluyó que:

- La resistencia al desgaste abrasivo bajo ciclos de congelamiento y deshielo creció con el contenido de cemento. Las pérdidas en peso seco registradas luego de 12 ciclos para dosificaciones de cemento entre un 6 y 9% fueron menores al 8%.
- La resistencia y la rigidez del suelo cemento crecieron de forma logarítmica con el tiempo.
- La resistencia a compresión simple creció con el contenido de cemento de forma proporcional a la raíz cuadrada para edades tempranas y aumentó de forma casi lineal para mayores tiempos de curado.
- La ganancia de resistencia a compresión simple entre los 7 y 28 días de edad creció con el contenido de cemento tendiendo a un valor constante.
- Se observó una gran dependencia entre las propiedades de la mezcla y la eficiencia del moldeo, compactación y curado.

**Luis Ernesto Guerrero Urquilla, Héctor Armando Miranda Martínez y José Antonio Ramírez (2008, Universidad de El Salvador)** en el trabajo de investigación **“Correlación del módulo de elasticidad dinámico, resistencia a la compresión y coeficiente de capa en bases de suelo cemento”**, buscó determinar algunas de las propiedades del suelo-cemento como lo



son la resistencia a la compresión, el módulo de elasticidad dinámico y el coeficiente de capa, para proporciones de cemento en peso entre el 2% y 8%, determinando además correlaciones entre estas variables. Las conclusiones de la investigación son:

- Que las mezclas óptimas (tanto técnica como económica) para las mezclas de suelo cemento investigadas, utilizando una arena limosa (SM) y cemento ASTM C 91 tipo M y ASTM C 1157 tipo HE, son de 2.5% y 2.0% de cemento en peso respectivamente. Con esta dosificación se obtiene una resistencia a compresión de 21 kg/cm<sup>2</sup> a los 7 días (requerimiento de SIECA, ACI 230.1R, PCA, INVIAS y AFP), siendo, los porcentajes de cemento mínimo para alcanzar dicha resistencia.
- La resistencia a compresión y el módulo de elasticidad dinámico son propiedades que dependen, tanto de la edad como del porcentaje de cemento, en peso, contenido en la mezcla. Por lo tanto, al realizar pruebas y ensayos de laboratorio es conveniente ajustar los valores obtenidos mediante una regresión múltiple.
- Que si se diseña y utiliza adecuadamente, el suelo cemento es una buena opción para la elaboración de bases y subbases de pavimentos.

**Eithel Xavier Murillo Vázquez (2010, Universidad de Cuenca)** en el trabajo de investigación **“Estudio del comportamiento de las bases de pavimentos rígidos en la ciudad de Cuenca y su influencia en el diseño”**, tuvo como objetivo estudiar la estabilización de bases granulares con adición de 7% de cemento a materiales procedentes de canteras del sector denominado “La Josefina”. Para ello se realizó la caracterización del material en estado natural y estabilizado con cemento, mediante los siguientes ensayos de laboratorio: análisis granulométricos, límites de consistencia, determinación de la el peso específico máximo y humedad óptima, CBR (Valor Relativo de Soporte) y resistencia a la compresión simple sin confinamiento. Además, se procedió a realizar las variantes de diseño con la aplicación del método AASHTO y se hizo un análisis económico por metro cuadrado entre las distintas alternativas planteadas. De la investigación se concluyó que:

- Los valores del CBR se incrementan al adicionar cemento al mismo material. Dicho incremento va desde el 159% hasta el 400%, (...), debe tenerse en cuenta que el valor de 400%, se da en la muestra 2, que se incrementa de un valor de 40%, al 200%, al adicionarse el cemento, las otras muestra tienen un promedio de 206 %.
- El peso específico máximo del material natural comparado con el obtenido con el material estabilizado (...), no varía sustancialmente.





## **2.2. Aspectos teóricos pertinentes**

### **2.2.1. Pavimento**

#### **2.2.1.1. Definición de pavimento**

Existe una gran variedad de definiciones para el pavimento, sin embargo, para la presente investigación se tomará aquella que busque ofrecer un énfasis en consideraciones y criterios de tipo estructural.

Para Flores Loza (2011), el pavimento es una capa o conjunto de capas con espesor variable que serán construidas con materiales resistentes a los efectos del tránsito e intemperismo (la resistencia puede ser intrínseca a los materiales que lo conforman u obtenida por medio de procesos físico-químicos). Este, tiene que ser capaz de soportar y transmitir las cargas aplicadas en la superficie de rodamiento hacia el terreno de cimentación, al mismo tiempo, disipar rápidamente y, con la mayor uniformidad posible, los esfuerzos resultantes de la aplicación de carga conforme se incrementa la profundidad de sus capas, sin acumular deformaciones importantes, además, debe proporcionar seguridad y confort en la capa que hace contacto con los neumáticos. Lo anterior, para un número de repeticiones consideradas dentro del tiempo de la vida útil.

#### **2.2.1.2. Pavimento rígido**

Este tipo de de pavimento esta conformado por una losa de concreto, con o sin refuerzo, que sirve como superficie de rodadura y como componente principal del pavimento. La losa se apoya en una capa de material estabilizado o no y, en algunos casos, directamente sobre el suelo de fundación compactado (Menéndez Acurio, 2016a).

El pavimento rígido se caracteriza por distribuir las cargas en una extensa área por debajo de la losa, esta condición genera menores deflexiones y esfuerzos a nivel de la subrasante. Para este tipo de pavimentos, resulta más importante la uniformidad de la superficie de apoyo de la losa que su resistencia.

En la Figura 3, se aprecia un ejemplo de cómo se distribuyen los esfuerzos de un pavimento rígido y de un pavimento flexible (Menéndez Acurio, 2016c).



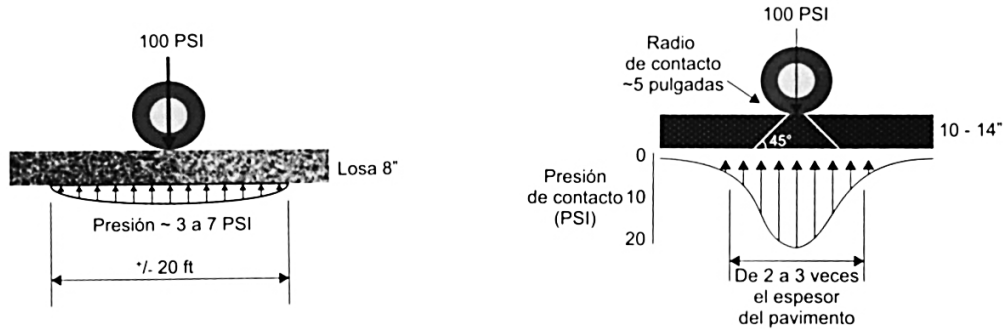


Figura 3 - Ejemplo de la distribución de las cargas a nivel de subbase en un pavimento de concreto (izquierda) y un pavimento flexible (derecha)

Fuente: Menéndez Acurio (2016c)

En la Figura 4 se muestra un corte típico de pavimento rígido, y sus componentes.

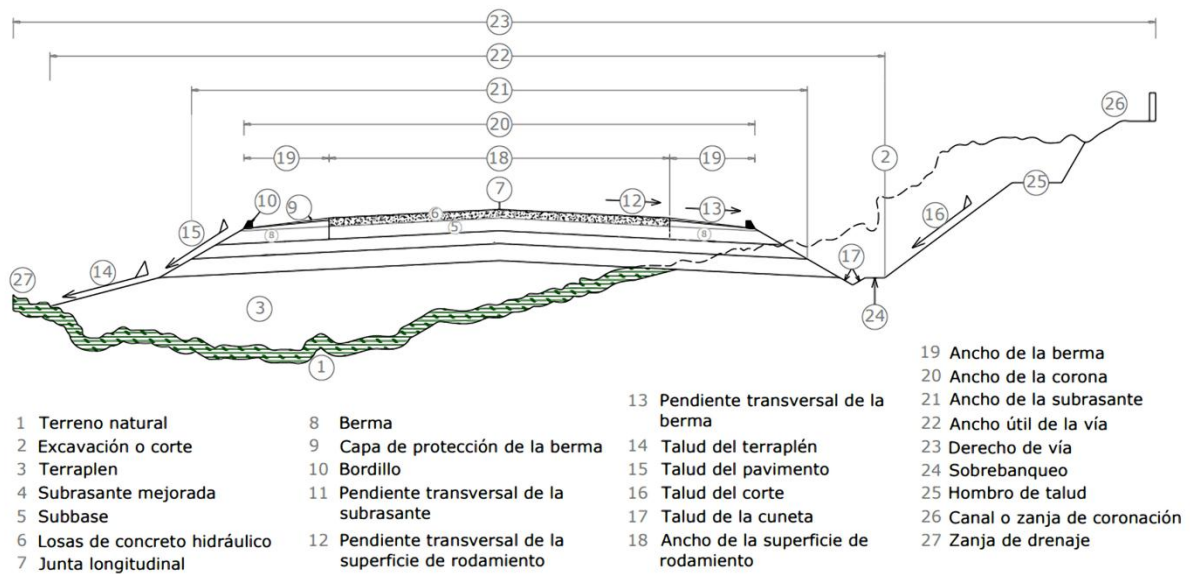


Figura 4 - Corte transversal de un pavimento rígido

Fuente: Flores Loza (2011)

### 2.2.1.2.1. Estructura del pavimento rígido

El pavimento rígido es una estructura compuesta específicamente por una capa de rodadura de losa de concreto, una capa de subbase granular, no obstante, esta capa puede ser de base granular o puede ser estabilizada, y el suelo de fundación o subrasante (MTC, 2014).

#### I. Losa de concreto

Usualmente construida con concreto de cemento Portland, puede ser definido como la mezcla de un aglomerante (cemento, agua y aire) y agregados (Menéndez Acurio, 2016a).

Su función es proporcionar una superficie uniforme, estable y de textura y color convenientes, resistir los efectos abrasivos del tránsito, brindar impermeabilidad, hasta donde sea posible,



impidiendo el paso del agua al interior del pavimento y soportar y transmitir en nivel adecuado los esfuerzos que le apliquen (Montejo Fonseca, 2002).

Existen tres tipos pavimentos de concreto (MTC, 2014):

- Pavimentos de concreto simple con juntas.
- Pavimentos de concreto reforzado con juntas.
- Pavimentos de concreto continuamente reforzados.

Los pavimentos de concreto con juntas son los que mejor se aplican a la realidad nacional debido a su buen desempeño y a los periodos de diseño que usualmente se emplean. Para los caminos de Perú se propone la aplicación de pavimentos de concreto con juntas.

## **II. Sub base**

Es una capa de material granular que se coloca sobre una superficie preparada. Estos materiales, debidamente aprobados, pueden ser obtenidos en forma natural o precesada y son proveientes de canteras u otras fuentes (MTC, 2013).

Las principales funciones de esta capa son las de dar soporte uniforme y constante al apoyo de losas, controlar las variaciones volumétricas de la subrasante y aumentar la capacidad de soporte de la fundación (Londoño Naranjo & Alvarez Pabón, 2008). También debe proporcionar soporte, especialmente, en las juntas de la losa para prevenir el bombeo de los finos en estas cuando los vehículos pesados circulan sobre ella y servir como filtro y/o capa anticontaminante de la losa con la subrasante, además, de servir como plataforma de trabajo cuando la subrasante tiene una baja capacidad de soporte (Menéndez Acurio, 2016a).

## **III. Sub rasante**

La sub rasante es la capa superior del terraplén o el fondo de las excavaciones en terreno natural, el cual, soportará la estructura del pavimento. Está conformada por suelos seleccionados, de características aceptables, y compactada para constituir un cuerpo estable, de tal manera que no se vea afectada por la carga que proviene del tránsito. Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño de la estructura del pavimento que se colocará encima.

Los suelos por debajo del nivel superior de la sub rasante, en una profundidad no menor de 0.60 m, deberán ser suelos adecuados y estables con  $CBR \geq 6\%$  (MTC, 2014).

Para la descripción de un suelo de fundación el MTC (2014) toma en cuenta distintas propiedades fundamentales, siendo una de ellas el CBR, presentando las categorías mostradas en la Tabla 1.

**Tabla 1 - Categorías de sub rasante**

Categorías de sub rasante	CBR
$S_0$ : Sub rasante inadecuada	CBR < 3%
$S_1$ : Sub rasante insuficiente	De CBR $\geq$ 3% a CBR < 6%
$S_2$ : Sub rasante regular	De CBR $\geq$ 6% a CBR < 10%
$S_3$ : Sub rasante buena	De CBR $\geq$ 10% a CBR < 20%
$S_4$ : Sub rasante muy buena	De CBR $\geq$ 20% a CBR < 30%
$S_5$ : Sub rasante excelente	De CBR $\geq$ 30%

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014)

### 2.2.2. Metodología de diseño AASHTO 93 para pavimento rígido

El método AASHTO 93 estima que, para una construcción nueva, el pavimento comienza a dar servicio a un nivel alto y que a medida que transcurre el tiempo, y con él las repeticiones de carga de tránsito, el nivel de servicio baja. El método impone un nivel de servicio final que se debe mantener al concluir el periodo de diseño. El espesor de concreto calculado finalmente debe soportar el paso de un número determinado de cargas sin que se produzca un deterioro del nivel de servicio inferior al estimado (MTC, 2014).

El cálculo del espesor de losa de concreto se realiza mediante un proceso iterativo, asumiendo espesores hasta que la ecuación propuesta por la AASHTO (1993), ecuación (1), llegue al equilibrio.

$$\begin{aligned}
 \log_{10} W_{8.2} = & Z_R S_o + 7.35 \log_{10}(D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.25 * 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}}} \\
 & + (4.22 - 0.32 p_t) * \log_{10} \left[ \frac{S'_c C_d (0.09 D^{0.75} - 1.132)}{1.51 * J \left[ 0.09 D^{0.75} - \frac{7.38}{(E_c/k_c)^{0.25}} \right]} \right]
 \end{aligned} \tag{1}$$

Donde:

$W_{8.2}$  = Número previsto de ejes equivalentes de 8.2 t a lo largo del periodo de diseño.

$Z_R$  = Desviación normal estándar.

$S_o$  = Desviación estándar global.

$D$  = Espesor del pavimento de concreto (mm).

$\Delta PSI$  = Diferencia entre los índices de servicio inicial y final.

$p_t$  = Índice de serviciabilidad o servicio final.

$S'_c$  = Resistencia a flexotracción del concreto (MPa).



$C_d$  = Coeficiente de drenaje.

$J$  = Coeficiente de transmisión de carga en las juntas.

$E_c$  = Módulo de elasticidad del concreto (MPa).

$k_c$  = Módulo de reacción combinado, compuesto de la subbase y la subrasante (MPa/m).

### 2.2.2.1. Parámetros que intervienen en el diseño

Los parámetros que intervienen, según el MTC (2014), son:

- Periodo de diseño
- Variables de diseño

### 2.2.2.2. Periodo de diseño

Según el MTC (2014), el periodo de diseño mínimo para pavimentos rígidos es de 20 años, pero este puede ajustarse según las condiciones específicas del proyecto.

### 2.2.2.3. Variables de diseño

Las variables que intervienen dentro de la ecuación (1) (pág. 12), según el MTC (2014), son las siguientes:

- El tránsito ( $W_{8,2}$ )
- Serviciabilidad ( $p_i - p_t$ )
- La confiabilidad y la desviación estándar global ( $S_o$ )
- El suelo y el efecto de las capas de apoyo ( $k_c$ )
- Resistencia a flexotracción del concreto ( $S'_c$ )
- Módulo elástico del concreto ( $E_c$ )
- Drenaje ( $C_d$ )
- Transferencia de cargas ( $J$ )

#### I. El tránsito ( $W_{8,2}$ )

El tránsito es una de las variables más importantes en el diseño de pavimentos, pues el volumen y dimensiones de los vehículos, así como el número y peso de sus ejes son factores que influyen en el diseño de un pavimento (Montejo Fonseca, 2002).

El método AASHTO 93 simplifica el efecto del tránsito transformando las cargas de ejes de todo tipo de vehículo en ejes simples equivalentes de 8.2 t de peso (MTC, 2014), comúnmente llamados ESALs (equivalent single axle load).

El MTC (2014) define tres categorías de tráfico, los cuales, se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2 - Número de repeticiones acumuladas de ejes equivalentes de 8.2 t (EE), en el carril de diseño (MTC, 2014)**

Tipo de tráfico	Tipos de tráfico pesado expresado en EE	Rangos de tráfico pesado expresado en EE
Categoría 1: bajo volumen	TP1	> 150,000 EE ≤ 300,000 EE
	TP2	> 300,000 EE ≤ 500,000 EE
	TP3	> 500,000 EE ≤ 750,000 EE
	TP4	> 750,000 EE ≤ 1'000,000 EE
Categoría 2: volumen medio	TP5	> 1'000,000 EE ≤ 1'500,000 EE
	TP6	> 1'500,000 EE ≤ 3'000,000 EE
	TP7	> 3'000,000 EE ≤ 5'000,000 EE
	TP8	> 5'000,000 EE ≤ 7'500,000 EE
	TP9	> 7'500,000 EE ≤ 10'000,000 EE
	TP10	> 10'000,000 EE ≤ 12'500,000 EE
	TP11	> 12'500,000 EE ≤ 15'000,000 EE
	TP12	> 15'000,000 EE ≤ 20'000,000 EE
	TP13	> 20'000,000 EE ≤ 25'000,000 EE
	TP14	> 25'000,000 EE ≤ 30'000,000 EE
Categoría 3: volumen alto	TP15	> 30'000,000 EE

Fuente: Menéndez Acurio (2016c)

## II. Serviciabilidad ( $p_i - p_t$ )

Este parámetro representa el grado de confort que la vía tiene y la escala varia de 0 a 5 (el valor de 5 corresponde a la mejor condición posible). En la ecuación de diseño se representa a través de dos valores: índice de servicio inicial " $p_i$ " e índice de servicio final o terminal " $p_t$ ". En la ecuación (1), pág. 12, se ingresa la diferencia entre los valores de servicialidad inicial y final, determinándose una variación o diferencial entre ambos índices " $\Delta PSI$ " (Menéndez Acurio, 2016c).

Los valores de serviciabilidad recomendados por el MTC (2014) se muestran en la Tabla 3.

**Tabla 3 - Índice de serviciabilidad inicial ( $p_0$ ), índice de serviciabilidad final ( $p_t$ ) y diferencial de serviciabilidad ( $\Delta PSI$ ) según rango de tráfico (MTC, 2014)**

Tipo de tráfico	Ejes equivalentes acumulados		Índice de serviciabilidad inicial ( $p_0$ )	Índice de serviciabilidad final ( $p_t$ )	Diferencial de serviciabilidad ( $\Delta PSI$ )
TP1	> 150,000	≤ 300,000	4.10	2.00	2.10
TP2	> 300,000	≤ 500,000	4.10	2.00	2.10



TP3	> 500,000	≤ 750,000	4.10	2.00	2.10
TP4	> 750,000	≤ 1'000,000	4.10	2.00	2.10
TP5	> 1'000,000	≤ 1'500,000	4.30	2.50	1.80
TP6	> 1'500,000	≤ 3'000,000	4.30	2.50	1.80
TP7	> 3'000,000	≤ 5'000,000	4.30	2.50	1.80
TP8	> 5'000,000	≤ 7'500,000	4.30	2.50	1.80
TP9	> 7'500,000	≤ 10'000,000	4.30	2.50	1.80
TP10	> 10'000,000	≤ 12'500,000	4.30	2.50	1.80
TP11	> 12'500,000	≤ 15'000,000	4.30	2.50	1.80
TP12	> 15'000,000	≤ 20'000,000	4.50	3.00	1.50
TP13	> 20'000,000	≤ 25'000,000	4.50	3.00	1.50
TP14	> 25'000,000	≤ 30'000,000	4.50	3.00	1.50
TP15	> 30'000,000		4.50	3.00	1.50

Fuente: Menéndez Acurio (2016c)

### III. La confiabilidad y la desviación estándar global ( $S_o$ )

Según la AASHTO (1993), la confiabilidad de un proceso de diseño-comportamiento de un pavimento, es la probabilidad de que una sección del pavimento, diseñada usando el proceso, se comportará satisfactoriamente bajo las condiciones de tráfico y medio ambiente, durante el periodo de diseño.

El MTC (2014) recomienda niveles de confiabilidad en función del tipo de tráfico, los cuales, se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4 - Valores recomendados de nivel de confiabilidad (R) y desviación estándar normal (Zr) según tipo de tráfico

Tipo de tráfico	Ejes equivalentes acumulados		Nivel de confiabilidad (R)	Desviación estándar normal (Zr)
TP0	> 100,000	≤ 150,000	65%	-0.385
TP1	> 150,000	≤ 300,000	70%	-0.524
TP2	> 300,000	≤ 500,000	75%	-0.674
TP3	> 500,000	≤ 750,000	80%	-0.842
TP4	> 750,000	≤ 1'000,000	80%	-0.842
TP5	> 1'000,000	≤ 1'500,000	85%	-1.036
TP6	> 1'500,000	≤ 3'000,000	85%	-1.036
TP7	> 3'000,000	≤ 5'000,000	85%	-1.036
TP8	> 5'000,000	≤ 7'500,000	90%	-1.282
TP9	> 7'500,000	≤ 10'000,000	90%	-1.282
TP10	> 10'000,000	≤ 12'500,000	90%	-1.282
TP11	> 12'500,000	≤ 15'000,000	90%	-1.282
TP12	> 15'000,000	≤ 20'000,000	90%	-1.282
TP13	> 20'000,000	≤ 25'000,000	90%	-1.282
TP14	> 25'000,000	≤ 30'000,000	90%	-1.282
TP15	> 30'000,000		95%	-1.645

Fuente: Ministerio de Transportes y Comunicaciones (2014)

La variabilidad es expresada en función de la desviación estándar global,  $S_o$ , que para un pavimento rígido es de 0.35 a 0.40. El MTC (2014) recomienda emplear 0.35, de los cuales, 0.25 corresponde al error en la ecuación de diseño y 0.10 al error en la previsión del tráfico (Menéndez Acurio, 2016c).

#### IV. Resistencia a flexotracción del concreto ( $S'_c$ )

También llamada módulo de ruptura, es un parámetro de diseño especificado para pavimentos rígidos. Esto, se debe principalmente al hecho de que los pavimentos son esforzados en flexión durante la carga del tráfico (Menéndez Acurio, 2016a).

El módulo de ruptura " $S'_c$ " se puede determinar mediante correlaciones con la resistencia a compresión " $f'_c$ " del concreto. El MTC (2014) recomienda la ecuación (2), propuesta por la American Concrete Institute.

$$S'_c = a\sqrt{f'_c} \quad (2)$$

Donde los valores de "a" varían entre 1.99 y 3.18 para valores en  $\text{kg/cm}^2$  (MTC, 2014).

#### V. Módulo elástico del concreto ( $E_c$ )

Según la AASHTO (1993), el módulo elástico del concreto viene a ser la relación esfuerzo-deformación del material bajo condiciones normales de carga del pavimento. Para ello el módulo elástico del concreto, también, puede ser determinado por medio de correlaciones, para lo cual, la American Concrete Institute (2015) presenta la siguientes:

$$E_c = 4700 \sqrt{f'_c} \quad (f'_c \text{ en Mpa}) \quad (3)$$

$$E_c = 15100 \sqrt{f'_c} \quad (f'_c \text{ en kg/cm}^2) \quad (4)$$

$$E_c = 57000 \sqrt{f'_c} \quad (f'_c \text{ en psi}) \quad (5)$$

#### VI. Drenaje ( $C_d$ )

El coeficiente de drenaje,  $C_d$ , se incluyó en el diseño de espesor para tener en cuenta cambios debido a las diferencias en las propiedades de drenaje de las capas de pavimento y el subsuelo (Menéndez Acurio, 2016c).

En la Tabla 5 se presenta el tiempo de remoción de agua y su relación con la calidad del drenaje.

Tabla 5 - Relación entre el tiempo de remoción del agua y la calidad del drenaje

Calidad del Drenaje	Tiempo de remoción del agua para drenar del 100 al 50% del agua drenable (AASHTO, 1993) (FHWA, 1992)
Excelente	2 horas
Bueno	1 día
Regular	1 semana
Malo	1 mes
Muy malo	No drena

Fuente: Menéndez Acurio (2016b)



Luego de seleccionar la calidad de drenaje, se determina el coeficiente de drenaje en función del grado de exposición de la estructura a niveles de humedad próximos a la saturación, como se observa en la Tabla 6.

**Tabla 6 - Valores recomendados del Coeficiente de Drenaje, Cd, para el diseño de pavimentos rígidos**

Calidad de Drenaje	% del tiempo en que el pavimento está expuesto a niveles de humedad próximos a la saturación			
	< 1%	1 a 5%	5 a 25%	>25%
Excelente	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00
Regular	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90
Malo	1.10 – 1.00	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80
Muy malo	1.00 – 0.90	0.90 – 0.80	0.80 – 0.70	0.70

Fuente: Menéndez Acurio (2016b)

## VII. Transferencia de cargas ( $J$ )

Es un parámetro empleado para el diseño de pavimentos de concreto que expresa la capacidad de la estructura como transmisora de cargas entre juntas y fisuras.

El valor de  $J$  es directamente proporcional al valor final del espesor de losa de concreto. Es decir, a menor valor de  $J$ , menor espesor de concreto. (MTC, 2014)

La Tabla 7 muestra los valores recomendados de coeficiente de transferencia de carga según la AASHTO (1993):

**Tabla 7 - Coeficiente de transferencia de carga**

Dispositivo de transferencia de carga	Asfalto		PCC unido	
	Sí	No	Sí	No
Tipo de pavimento				
Simple con juntas y reforzado con juntas	3.2	3.8 – 4.4	2.5 – 3.1	3.6 – 4.2
De concreto con refuerzo continuo	2.9 – 3.2	NA	2.3 – 2.9	NA

Fuente: AASHTO (1993)

### 2.2.2.4. El suelo y el efecto de las capas de apoyo

Una variable de entrada en el diseño es el valor del módulo de reacción combinado " $k_c$ ", compuesto de la subbase y la subrasante, que contempla una mejora en el nivel de soporte de la subrasante con la colocación de capas intermedias granulares o tratadas. Este efecto mejora las condiciones de apoyo y puede llegar a reducir el espesor calculado de losa de concreto (MTC, 2014).

El valor de  $k_c$  puede determinarse a partir del ensayo de carga directa sobre una placa (ASTM D1196) o mediante correlaciones con el valor de CBR.



## I. Compactación de Suelos

La compactación, es el proceso de incrementar la cantidad de sólidos por unidad de volumen de suelo, con técnicas mecánicas (Menéndez Acurio, 2016a). Esta compactación pretende mejorar características como (Montejo Fonseca, 2002):

- Resistencia
- Compresibilidad
- Relación esfuerzo-deformación
- Permeabilidad
- Flexibilidad
- Resistencia a la erosión

De entre todos los factores que influyen en la compactación, Juárez Badillo & Rico Rodríguez (1995) mencionan que dos son los más importantes: el contenido de agua del suelo durante la compactación y la energía de compactación suministrada al suelo. Para tales factores, Montejo Fonseca (2002) menciona los siguientes efectos:

- El contenido de agua, cuanto menor es la diferencia entre el contenido de agua de compactación y el contenido de agua óptimo la densidad seca resultante de la compactación es mayor (Figura 5).

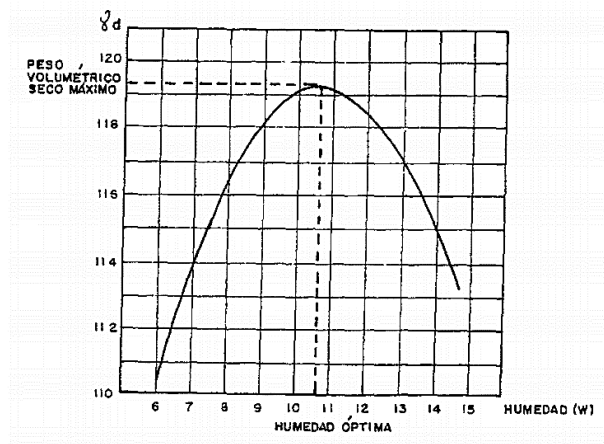


Figura 5 - Curva típica de compactación de suelos

Fuente: Montejo Fonseca (2002)

- Energía de compactación, al aumentar la energía de compactación la curva de compactación se desplaza hacia arriba y hacia la izquierda. Es decir, aumenta la máxima densidad seca y disminuye el contenido de agua óptimo, tal como se observa en la Figura 6.

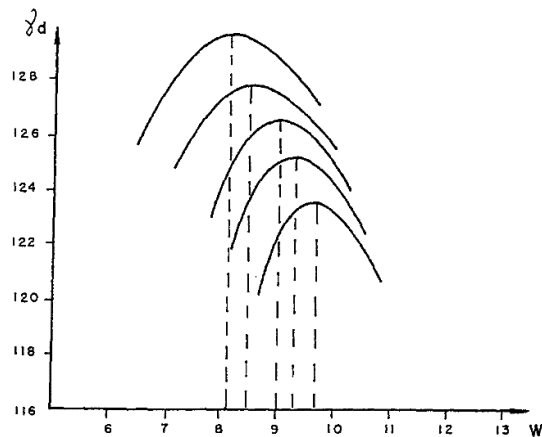


Figura 6 – Efecto de la energía de compactación en el peso volumétrico seco

Fuente: Montejo Fonseca (2002)

R.R. Proctor estableció el primer método de prueba de compactación conocido como prueba Proctor Estándar, que brinda una energía de compactación de  $12,300 \text{ lbf}\cdot\text{pie}/\text{pie}^3$  y que fue establecida por Proctor para reproducir los pesos específicos secos que podían lograrse económicamente (es decir, con un número moderado de pasadas) con el equipo comercialmente disponible en aquella época. Debido al desenvolvimiento de este último se condujo a una modificación de la prueba, incrementando la energía de compactación a  $56\,200 \text{ lbf}\cdot\text{pie}/\text{pie}^3$  (4.5 veces); incrementando así la densidad máxima en 9% y disminuyendo la humedad óptima en 3%. (Montejo Fonseca, 2002) & (Juárez Badillo & Rico Rodríguez, 1995)

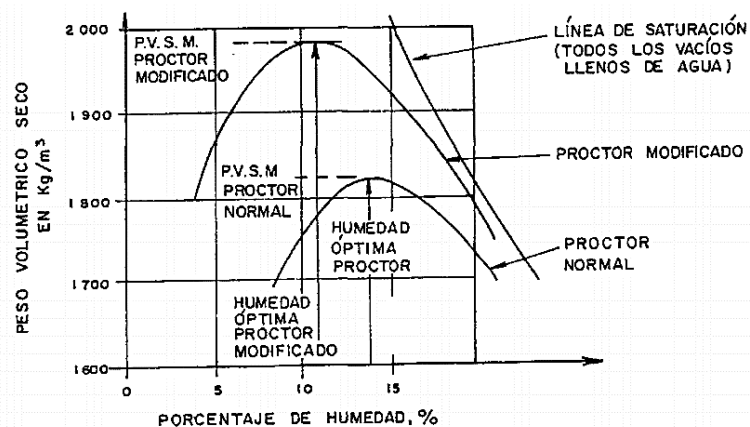


Figura 7 – Representación de la prueba de compactación Proctor Modificado y Estándar

Fuente: Montejo Fonseca (2002)

## II. Relación de soporte CBR

Es la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad dadas. El CBR se obtiene como la relación de la carga unitaria necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón (con un área de  $19.4 \text{ cm}^2$ ) dentro de la muestra compactada de suelo con

respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. (Bowles, 1980)

Los valores de carga unitaria patrón se muestran en la Tabla 8.

**Tabla 8 - Valores de carga unitaria patrón para determinar el CBR**

Penetración		Carga Unitaria Patrón	
mm	pulg	Mpa	psi
2.5	0.10	6.9	1,000
5.0	0.20	10.3	1,500

Fuente: Bowles (1980)

La Tabla 9 muestra valores típicos de CBR en función del tipo de suelo.

**Tabla 9 – Valores típicos de CBR según el tipo de suelo**

Clasificación unificada (SUCS)	CBR en campo
GW	60 – 80
GP	35 – 60
GM	40 – 80
GC	20 – 40
SW	20 – 40
SP	15 – 25
SM	20 – 40
SC	10 – 20
ML	5 – 15
CL	5 – 15
OL	4 – 8
MH	4 – 8
CH	3 – 5
OH	3 – 5

Fuente: Menéndez Acurio (2016a)

#### **2.2.2.4.1. Método AASHTO 93 para determinar el módulo efectivo de reacción de la subrasante ( $k$ )**

El suelo de fundación es caracterizado por el módulo de reacción combinado " $k_c$ ", la cual, es una definición proporcionada por el MTC (2014). Más, la AASHTO (1993) lo define como el módulo de efectivo de reacción de la subrasante " $k$ ". De igual forma, esta contempla la mejora de soporte de la subrasante con el colocado de una subbase.

Para determinar el valor de  $k$ , se requiere definir previamente el tipo y espesor de subbase, el factor de pérdida de soporte y la profundidad a la que se encuentra el lecho rocoso (Menéndez Acurio, 2016a).

El método AASHTO 93 requiere conocer los módulos resilientes de la subrasante y subbase, los cuales, pueden determinarse mediante correlaciones con el CBR. Las ecuaciones (6) y (7) son aplicables para valores de hasta 80% de CBR (Menéndez Acurio, 2016a).

$$M_r = 2555 CBR^{0.64} \text{ psi (Daniel et al., 2012)} \tag{6}$$

$$M_r = 17.6 CBR^{0.64} \text{ MPa (Powell et al., 1984)} \tag{7}$$

Conociendo los valores de módulo resiliente de la subrasante y de la subbase, determinamos el módulo de reacción compuesto, considerando la presencia de subbase, mediante el ábaco de la Figura 8 (AASHTO, 1993).

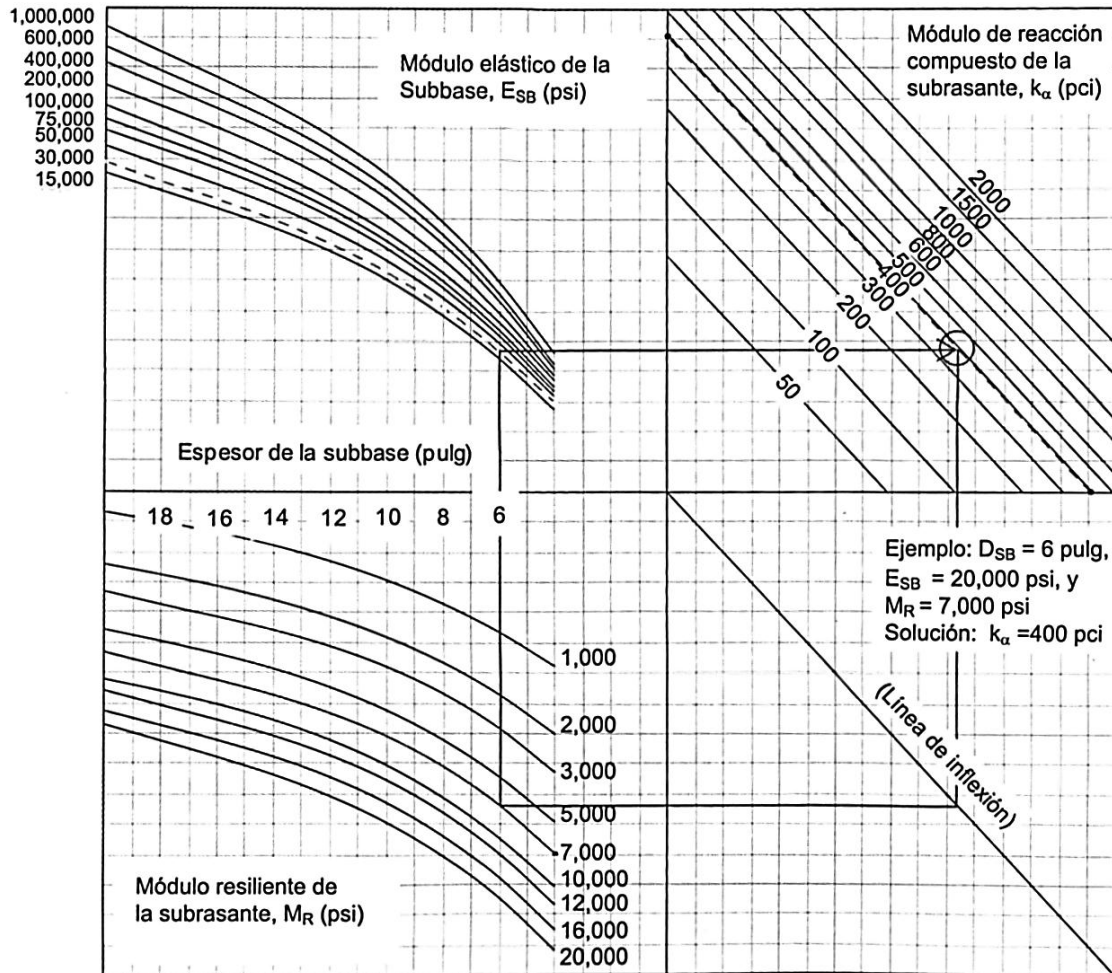


Figura 8 – Ábaco para la determinación del módulo de reacción compuesto de la subrasante,  $k_{\alpha}$ , asumiendo un espesor semi-infinito de subrasante.

Fuente: AASHTO (1993)

A su vez, la Figura 8 está basada en la ecuación (8) (Christopher, Schwartz, & Boudreau, 2006):

$$\ln k_{\alpha} = -2.807 + 0.1253(\ln D_{SB})^2 + 1.062(\ln M_R) + 0.1282(\ln D_{SB})(\ln E_{SB}) - 0.4114(\ln D_{SB}) - 0.0581(\ln E_{SB}) - 0.1317(\ln D_{SB})(\ln M_R) \tag{8}$$

Donde:

$k_{\alpha}$  = Módulo de reacción compuesto de la subrasante considerando que el lecho rocoso está a un espesor semiinfinito (10 pies para efectos prácticos) (pci)

$D_{SB}$  = Espesor de la subbase (pulg)

$E_{SB}$  = Módulo resiliente de la subbase (psi)

$M_R$  = Módulo resiliente de la subrasante (psi)

En caso de que la cimentación rígida se encuentre a una profundidad menor a 10 pies (3 m), se debe corregir el valor de  $k_\infty$ , obtenido anteriormente, ingresando al nomograma de la Figura 9.

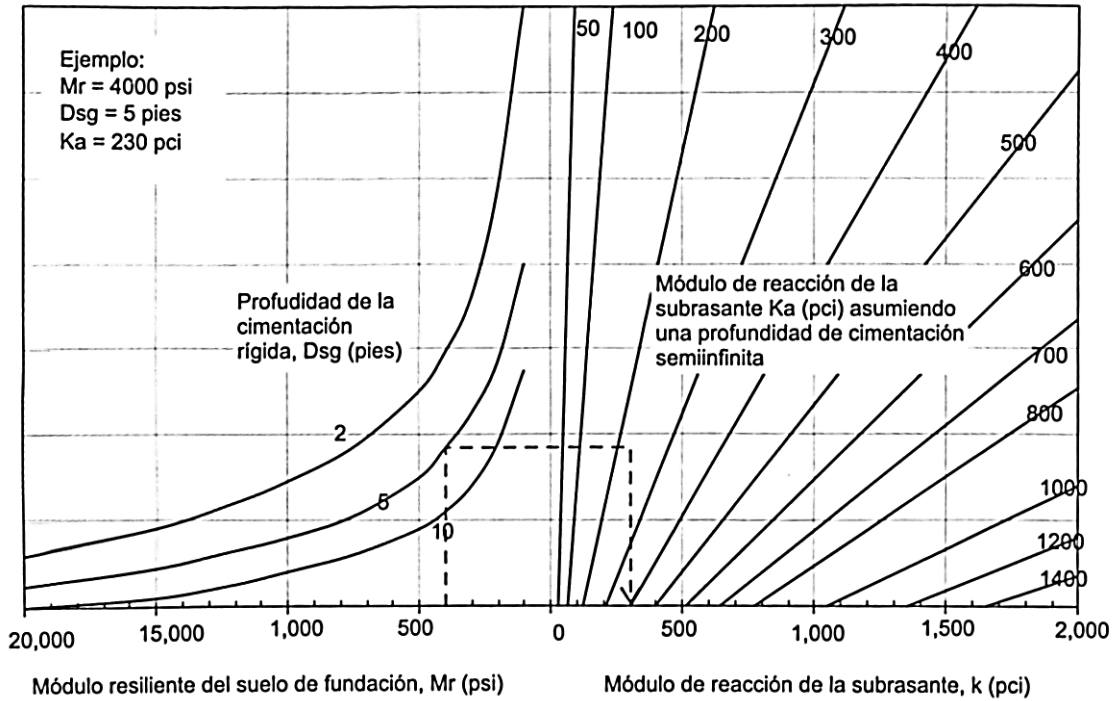


Figura 9 - Nomograma para determinar el módulo de reacción en función de la profundidad del lecho rocoso

Fuente: Menéndez Acurio (2016c)

Los resultados de la Figura 9 pueden ser obtenidos mediante la ecuación (9) (Christopher, Schwartz, & Boudreau, 2006).

$$\ln k_{rf} = 5.303 + 0.0710(\ln D_{SB})(\ln M_R) + 1.366(\ln k_\infty) - 0.9187(\ln D_{SG}) - 0.6837(\ln M_R) \quad (9)$$

Donde:

$k_{rf}$  = Módulo de reacción corregido por profundidad de la cimentación rígida (pci)

$D_{SB}$  = Espesor de la subbase (pulg)

$M_R$  = Módulo resiliente de la subrasante (psi)

$k_\infty$  = Módulo de reacción compuesto de la subrasante considerando que el lecho rocoso está a un espesor semiinfinito (pci)

$D_{SG}$  = Espesor de la subrasante hasta la cimentación rígida (pulg)

El valor del módulo de reacción compuesto " $k_\infty$ ", o  $k_{rf}$  en caso de ser necesario, es ajustado por el potencial de pérdida de soporte debido a la erosión de la subbase.



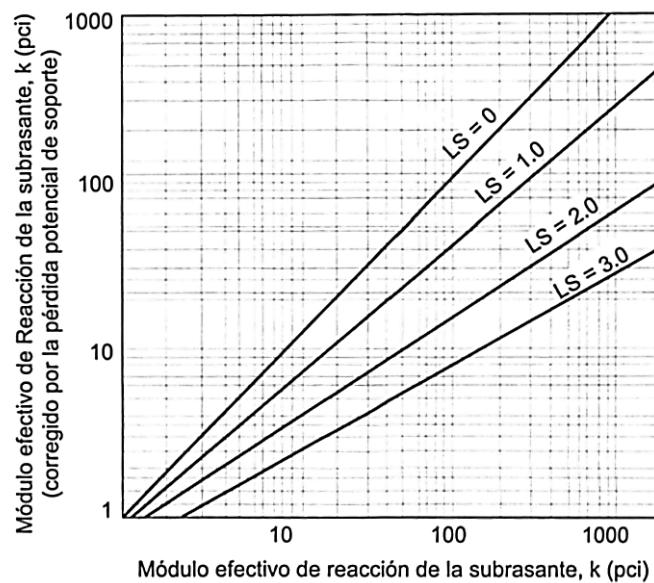
El factor de pérdida de soporte de la subbase “LS” está relacionado con el movimiento vertical del suelo, resultado de la formación de vacíos por debajo de la losa de concreto. Los valores típicos, según la AASHTO (1993), de factor de pérdida de soporte se muestran en la Tabla 10.

**Tabla 10 – Valores típicos del factor de pérdida de soporte (LS)**

Tipo de Materia	Pérdida de soporte (LS)
Base granular tratada con cemento (E = 1'000,000 – 2'000,000 psi)	0.0 – 1.0
Mezclas de agregado con cemento (E = 500,000 – 1'000,000 psi)	0.0 – 1.0
Base tratada con asfalto (E = 350,000 – 1'000,000 psi)	0.0 – 1.0
Mezclas estabilizadas con asfalto (E = 40,000 – 300,000 psi)	0.0 – 1.0
Estabilizado con cal (E = 20,000 – 70,000 psi)	1.0 – 3.0
Materiales granulares (E = 15,000 – 45,000 psi)	1.0 – 3.0
Material fino o suelo de fundación natural (E = 3,000 – 40,000 psi)	2.0 – 3.0

Fuente: Menéndez Acurio (2016a)

El valor ajustado por el factor de pérdida de soporte “LS” se obtiene mediante la Figura 10.



**Figura 10 – Corrección del módulo efectivo de la reacción de la subrasante por potencial de pérdida de soporte de la subbase**

Fuente: Menéndez Acurio (2016c)

Los resultados de ajuste (Figura 10) también pueden ser obtenidos mediante la ecuación (10) (Christopher, Schwartz, & Boudreau, 2006).

$$k = 10^{(-0.16 LS + 1) \log(k_{rf}) + (-0.054 LS - 0.015)} \tag{10}$$



Donde:

$k$  = Módulo efectivo de reacción de la subrasante corregido por la pérdida potencial de soporte de la subbase

$k_{rf}$  = Módulo de reacción corregido por profundidad de la cimentación rígida (pci)

$LS$  = Factor de pérdida de soporte

### 2.2.3. Estabilización de suelos

La estabilización de suelos viene a ser el mejoramiento de las características mecánicas de un suelo a través de procedimientos mecánicos e incorporación de productos químicos, naturales o sintéticos, y su permanencia de tales propiedades en el tiempo; comúnmente realizándose en suelos inadecuados, o pobres, conocidas como estabilización de suelo cemento, suelo cal, suelo asfalto y otros productos diversos. También se pueden incrementar las características mecánicas de los suelos de buena calidad, con la finalidad de, satisfacer las especificaciones y requerimientos de los proyectos. (Flores Loza, 2011) & (MTC, 2014)

El MTC (2014) menciona que cuando se estabiliza una subbase granular o base granular, para obtener un material de mejor calidad se denomina subbase o base granular tratada, sea, con cemento, con cal, con asfalto u otros. Por ende, el suelo estabilizado de estudio se denomina “subbase tratada con cemento”.

### 2.2.4. Suelo tratado con cemento

Los suelos tratados con cemento son aquellos materiales que utilizan cemento como conglomerante. Se dosifican de manera que resulte un material de consistencia seca, apto para ser compactado con rodillos, y que cumpla unas determinadas características resistentes a una cierta edad. Usualmente, estos se utilizan como base o subbase de pavimentos (IECA, 2017). A diferencia del concreto, los granos de los suelos no están envueltos en pasta de cemento endurecido, sino, están puntualmente unidos entre sí (MTC, 2014).

#### 2.2.4.1. Componentes

Un suelo tratado con cemento está compuesto por el suelo a tratar, cemento, agua y aditivos, en caso sea necesario.

##### I. Cemento

El cemento, mezclado íntimamente con el material granular y con el transcurso del tiempo, proporciona a la mezcla un incremento en su resistencia mecánica y mejora su durabilidad,



entendiendo por tal la resistencia a los agentes físicos y químicos agresivos, como la estabilidad dimensional.

En los materiales tratados con cemento, el tipo de conglomerante tiene una importancia menor en comparación con la dosificación de este o la densidad alcanzada en la compactación. Por lo cual, es posible utilizar la gran mayoría de los cementos comercializados, en muchos casos, su elección dependerá de la disponibilidad y precio de estos (IECA, 2017).

El cemento utilizado, según Menéndez Acurio (2016b) basado en las normas NTP, es el cemento Portland.

Según el MVCS (2012), para obtener una estabilización del tipo flexible el porcentaje de cemento a adicionar debe variar entre 1% y 4%, y para obtener una estabilización del tipo rígida los porcentajes deberían de variar entre 6% y 14%.

## **II. Agua**

El agua es de gran importancia debido a que, si el contenido de agua es insuficiente durante el proceso de fraguado, el cemento cesará su reacción y, por ende, la resistencia no será la diseñada (Flores Loza, 2011).

El agua potable es considerado adecuado y puede ser empleado sin necesidad de realizar ensayos de calificación (Menéndez Acurio, 2016b).

## **III. Aditivos**

Los aditivos, en caso de ser necesarios, de más interés son los retardadores de fraguado, cuya finalidad es reducir el tiempo de fraguado del cemento y, por ende, mayor tiempo de trabajabilidad de la mezcla (IECA, 2008).

Según las EG-2013, la compactación debe terminarse en un lapso no mayor a 2 horas desde el inicio de la mezcla de los insumos.

## **IV. Suelo**

Según las EG-2013, el suelo a tratar con cemento podrá ser suelo de afirmado proveniente de la escarificación de la capa superficial existente o ser un suelo natural.

El IECA & CEDEX (2003) menciona que en la fabricación de suelo cemento se pueden utilizar prácticamente todos los tipos de suelos, siempre que se alcancen las resistencias exigidas. Además, los suelos de granulometrías bien gradadas son los recomendables, ya que, habitualmente redundan en una mejor compactación del suelo (Serigos, 2009).



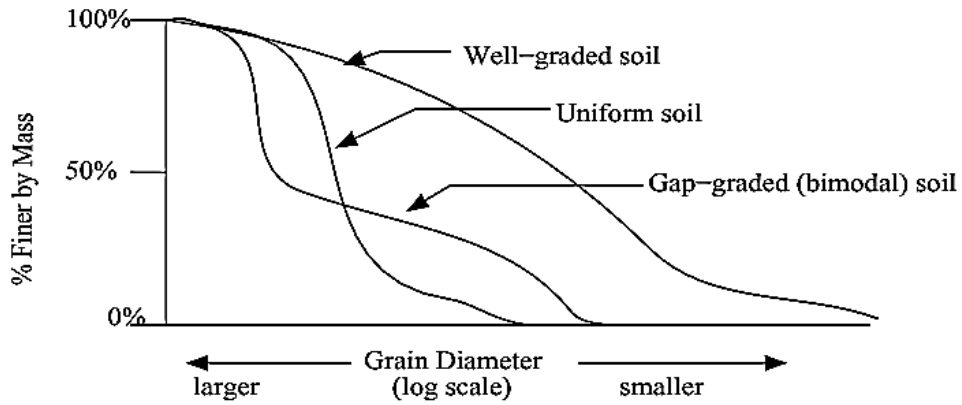


Figura 11 - Curvas de gradación según el tipo de suelo

Fuente: Swan (2005)

**2.2.4.2. Tipos de materiales tratados con cemento**

Los materiales tratados con cemento se clasifican en función de las características del material granular utilizado y de la resistencia alcanzada por la mezcla a una determinada edad, como se muestra en la Figura 12.

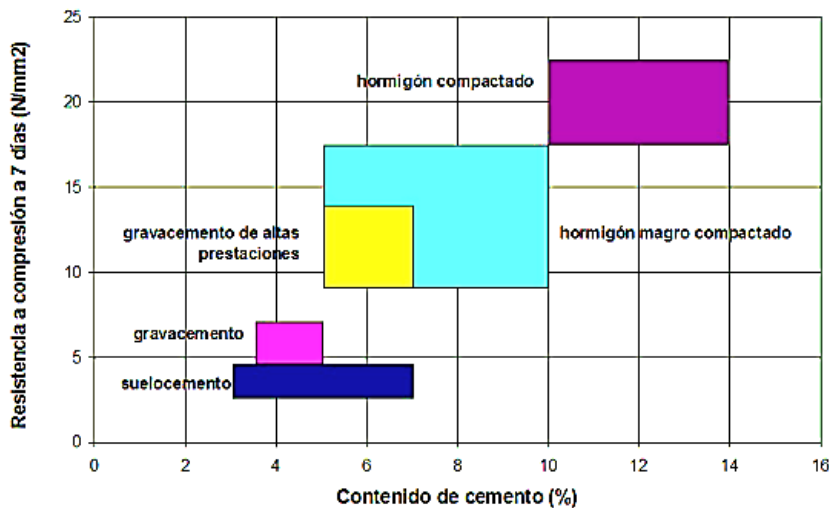


Figura 12 - Clasificación de los materiales tratados con cemento

Fuente: IECA (2017)

**2.2.4.2.1. Suelocemento**

Se trata de un material fabricado con suelos granulares, cuyo contenido de cemento en masa suele ser del orden del 3 - 7 %. A largo plazo, su resistencia a compresión suele ser superior a 4 MPa y superior a 2.5 MPa a 7 días (según el PG-3 del Ministerio de Fomento), y su módulo de elasticidad presenta valores del orden de 6.000 MPa con suelos granulares.

Para Perú, en las EG – 2013, la resistencia a compresión mínima a alcanzar debe ser de 1.8 MPa, luego de 7 días de curado húmedo.



#### **2.2.4.2.2. Gravacemento**

Se trata de un material constituido por áridos de machaqueo, sin finos plásticos y con una granulometría ajustada, y contenido de cemento del orden del 3,5 – 5 %. A largo plazo, su resistencia a compresión suele ser superior a 8 MPa y superior a 4 MPa a 7 días (según el PG - 3 del Ministerio de Fomento), y su módulo de elasticidad es del orden de 20.000 MPa.

#### **2.2.4.2.3. Gravacemento de alta resistencia**

En la fabricación de este material, se emplean áridos con las mismas exigencias que los de la gravacemento, y un contenido de cemento algo más elevado, en el intervalo del 5 al 7%. Ello se traduce en una resistencia a compresión a largo plazo superior a 14 MPa y superior a 8 MPa a 7 días, y un módulo de elasticidad del orden de 25.000 MPa.

#### **2.2.4.2.4. Hormigón magro compactado**

Se trata de un material constituido por áridos similares a los empleados en la gravacemento, y con un contenido de cemento del orden del 5 al 10 %. A largo plazo, la resistencia a compresión suele ser superior a 22 MPa y superar 12 MPa a 7 días, y el módulo de elasticidad es del orden de 30.000 MPa. Se emplea fundamentalmente como capa de base.

#### **2.2.4.2.5. Hormigón compactado**

Se trata de un material constituido por áridos similares a los empleados en la gravacemento y un contenido de cemento del orden del 10 - 14 %. A largo plazo, la resistencia a compresión suele ser superior a 35 MPa y superior a 18 MPa a 7 días y el módulo de elasticidad es del orden de 33.000 MPa.

#### **2.2.4.3. Ventajas**

Las principales ventajas dentro de la estructura de un pavimento, según el ISCYC (2011), son las siguientes:

- Material durable, el suelo tratado con cemento presenta una mayor durabilidad que otros materiales de pavimentos de similar costo inicial.
- Mayor uso de materiales locales.
- Menor impacto ambiental, debido a la menor dependencia en la explotación de bancos de material.

- Mayor rigidez y distribución de carga aplicada al pavimento, permite distribuir la carga en un área mayor a comparación de una base granular (Figura 13), por tanto, es posible contar con estructuras de pavimentos menos robustas o con un menor número de capas.
- Resistencia a los agentes atmosféricos, especialmente la reducción de la sensibilidad al agua.
- Aumento de resistencia y menores intervenciones de mantenimiento.

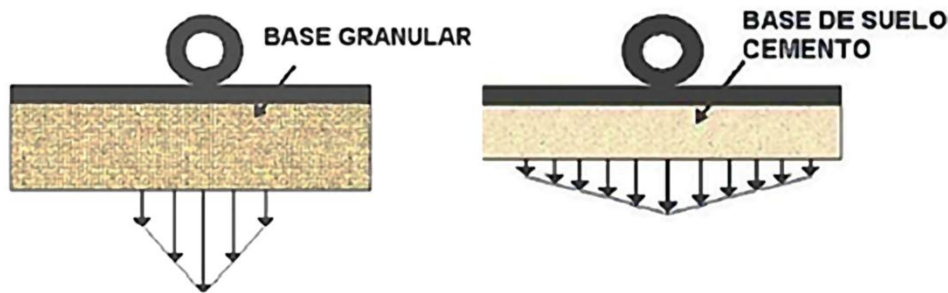


Figura 13 - Distribución de esfuerzos para capas de suelo cemento y estabilizado granular

Fuente: Serigos (2009)

#### 2.2.4.4. Propiedades

##### 2.2.4.4.1. Densidad y humedad

Por lo general los valores de máxima densidad seca y contenido de humedad óptimo de un suelo tratado con cemento, alcanzados en la compactación, no presentan grandes diferencias con respecto a los determinados sin la adición de cemento (IECA & CEDEX ,2003).

##### 2.2.4.4.2. Permeabilidad

La permeabilidad de un material viene definida por su coeficiente de permeabilidad, que expresa la velocidad de paso de un líquido a través de un medio poroso.

En general, la permeabilidad de los materiales tratados con cemento es muy baja, por la falta de huecos, debido a que de la pasta endurecida rellena los huecos entre los áridos (IECA & CEDEX ,2003).

##### 2.2.4.4.3. Resistencia a compresión

El valor de resistencia a compresión es el más utilizado para caracterizar un suelo tratado con cemento, además, la resistencia a compresión a alcanzar depende de las particularidades de cada proyecto. La Tabla 11, muestra los requerimientos mínimos de resistencia a compresión en varios países.

Tabla 11 – Requerimientos mínimos para la evaluación de la resistencia a compresión exigidas en varios países

País	Tipo de Suelo	Mínima resistencia a compresión (7 días de curado húmedo)	
El Salvador	Todos los Suelos	284 psi (20 kg/cm <sup>2</sup> )	
EUA (Marina)	Pavimento Flexible	Base	750 psi (53 kg/cm <sup>2</sup> )
		Subbase	300 psi (21 kg/cm <sup>2</sup> )
	Pavimento Rígido	Base	500 psi (35 kg/cm <sup>2</sup> )
		Subbase	200 psi (14 kg/cm <sup>2</sup> )
Colombia (INVIAS)	Suelo Cemento (SC – R)	300 psi (21 kg/cm <sup>2</sup> )	
Perú (EG - 2013)	Suelo estabilizado	257 psi (18 kg/cm <sup>2</sup> )	
España (PG – 3)	Suelo Cemento	357 psi (25 kg/cm <sup>2</sup> )	

Fuente: Elaboración Propia en base a ISCYC (2011), INVIAS (2012a), EG – 2013 (2013) y PG – 3 (2015)

**2.2.4.4. Factores que influyen en la resistencia a compresión**

Los principales factores que influyen en la resistencia a compresión y, por ende, en las propiedades mecánicas del suelo, según Serigos (2009), son:

**I. La granulometría**

Las granulometrías mejores gradadas presentan mayores valores de resistencia a compresión, por lo tanto, suelos bien gradados necesitan menor contenido de cemento que aquellos más uniformes, como se observa en la Figura 14.

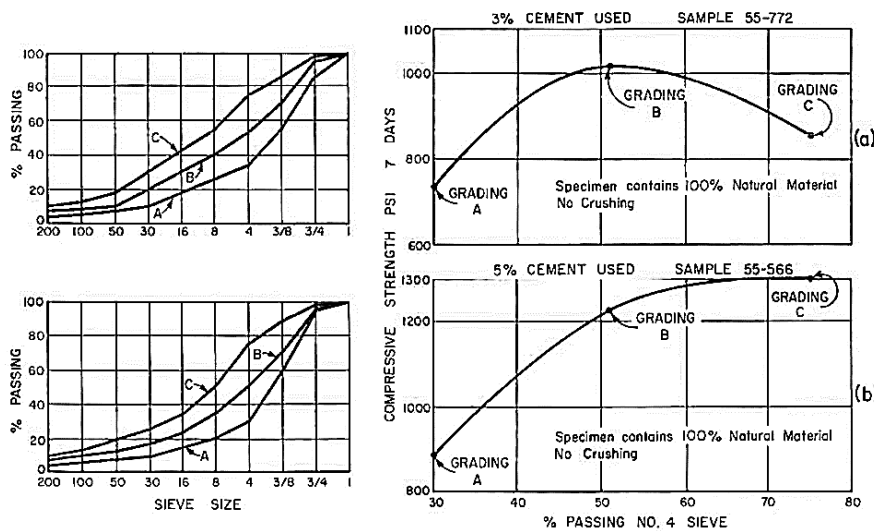


Figura 14 - Relación entre el porcentaje de paso del tamiz N° 4 y la resistencia a la compresión.

Fuente: Hveem & Zube (1963)

**II. Peso volumétrico**

Se observa mayores valores de resistencia a compresión a mayor densidad alcanzada con la compactación, como se observa en la Figura 15.

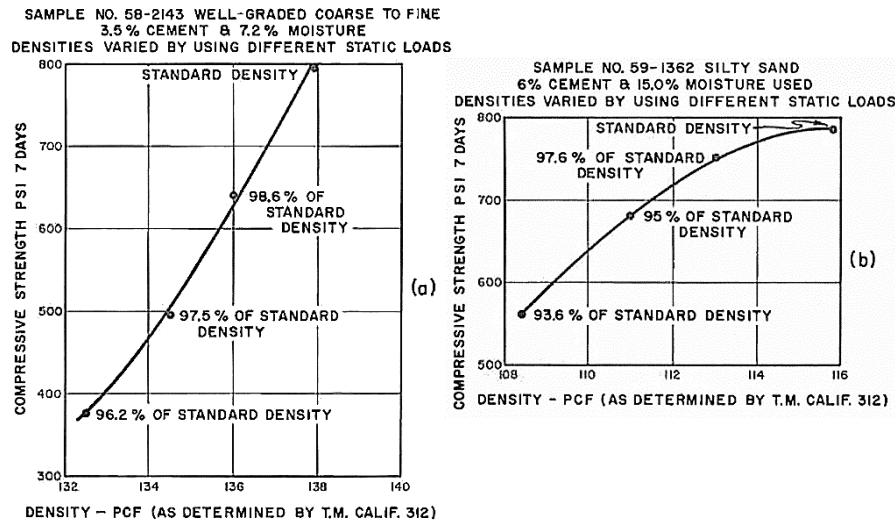


Figura 15 - Relación entre la resistencia a la compresión y la densidad

Fuente: Hveem & Zube (1963)

Cabe mencionar, que para una disminución de 5% en la máxima densidad seca (Proctor Modificado) puede suponer perder entre el 25 a 50% de la resistencia a compresión (IECA, 2017), como se muestra en la Figura 16.

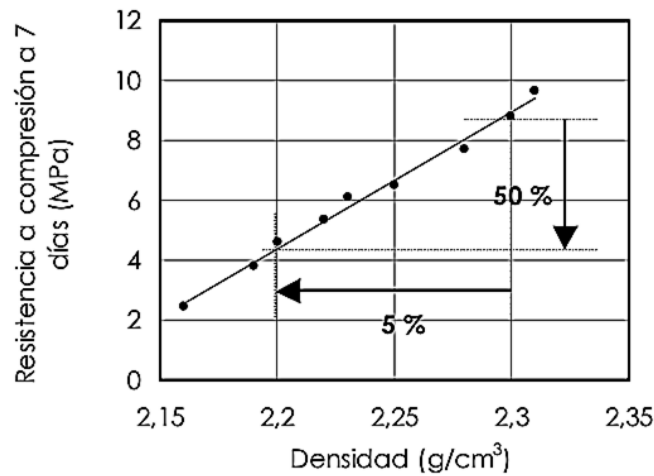


Figura 16 - Variación de la resistencia a compresión con la densidad de compactación

Fuente: IECA (2017)

### III. Contenido de Cemento

En general, la resistencia a compresión incrementa a medida en que incrementa el contenido de cemento de la mezcla, (De la Fuente Lavalle, 2013), como se observa en la Figura 17.

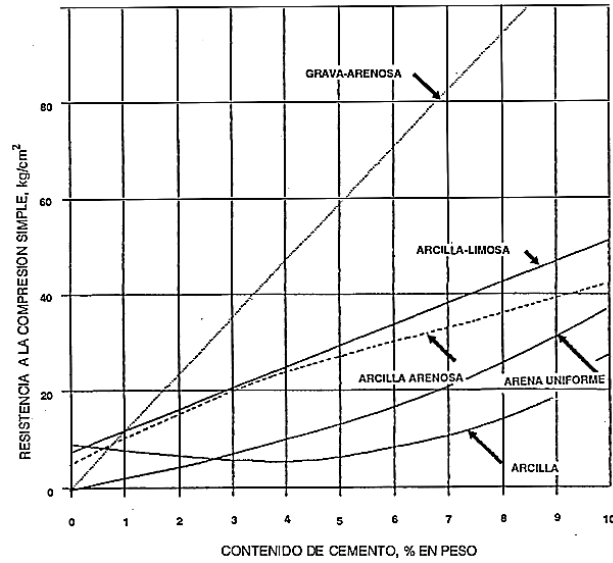


Figura 17 - Curvas típicas que muestran la variación de la resistencia a la compresión simple con el contenido  
Fuente: Hveem & Zube (1963)

**IV. Tiempo y condiciones de curado**

El suelo cemento se comporta en forma similar a un concreto en cuanto al efecto del curado, que tiene gran importancia, amentando la resistencia con un buen curado (De la Fuente Lavalle, 2013). La Figura 18 muestra una ganancia de la resistencia a compresión con respecto al tiempo de curado.

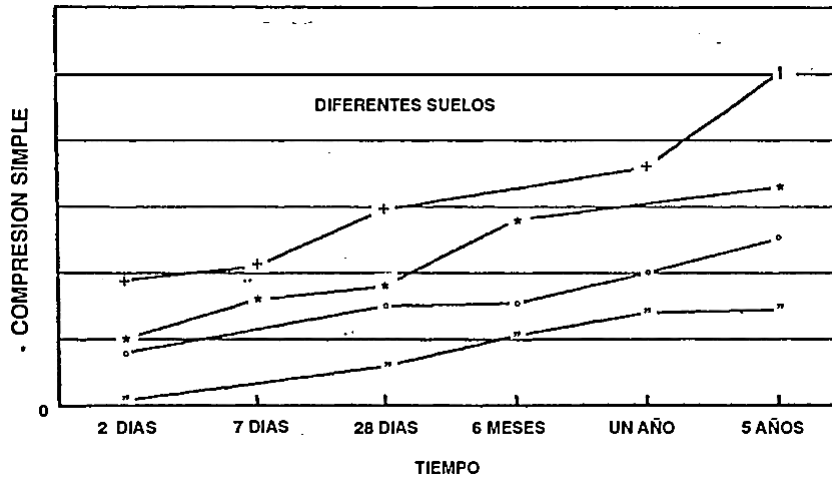


Figura 18 - Variación de la resistencia a compresión simple con el tiempo  
Fuente: De la Fuente Lavalle (2013)

En la Figura 19, se puede observar la ganancia de resistencia a compresión de proyectos evaluados a muy largo plazo.

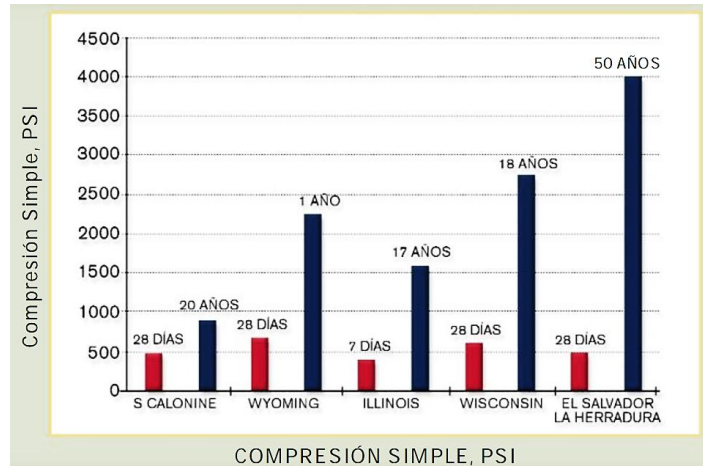


Figura 19 - Ganancia de resistencia a compresión a largo plazo

Fuente: De la Fuente Lavalle (2013)

### V. Contenido de humedad

Un mayor contenido de humedad en la mezcla al momento de someter a compresión significa menor resistencia, como se observa en la Figura 20.

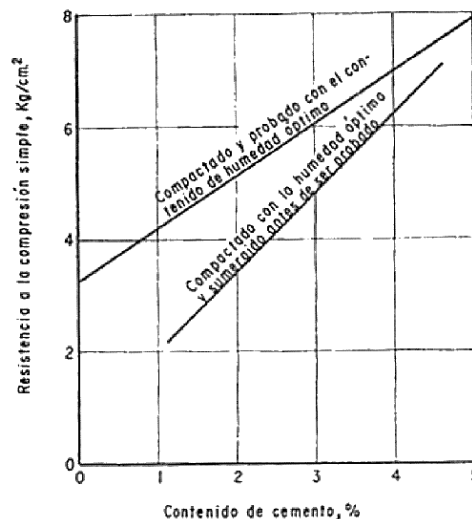


Figura 20 - Influencia del contenido de humedad en la resistencia

Fuente: Serigos (2009)

#### 2.2.4.4.5. Valor relativo de soporte (CBR)

Es normal que cualquier suelo tratado con cemento, sobre todo los que tienen suelos granulares, alcancen valores de CBR tan altos que sea difícil su interpretación y poco confiable (De la Fuente Lavalle, 2013).

En la Tabla 12, se muestran valores de CBR en relación con la resistencia a compresión de suelos tratados con cemento.

**Tabla 12 - Valores de CBR y resistencia a compresión en mezclas de suelo cemento**

Tipo de Capa	Resistencia a compresión simple (kg/cm <sup>2</sup> )	C.B.R. (%)	Expansión (%)
Subbases, Material de relleno para trincheras	3.5 – 10.5	20 – 80	27
Subbases o bases para tránsito muy ligero	7.0 – 14.0	50 – 150	2
Bases para tráfico intenso	14.0 – 56.0	200 – 600	2
Protección de terraplenes contra erosión y acción de agua	56	600	2

Fuente: De la Fuente Lavalle (2013)

#### 2.2.4.4.6. Agrietamiento

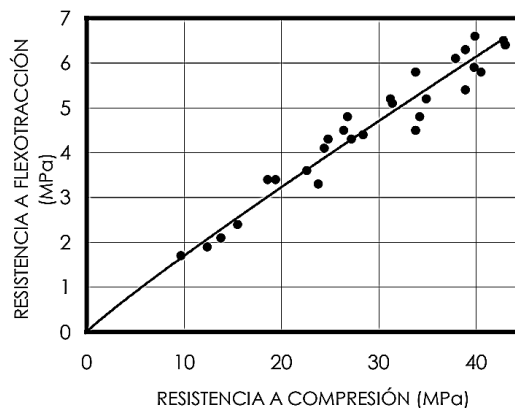
En función de la resistencia a compresión a 7 días se puede estimar, cualitativamente, el agrietamiento de bases tratadas con cemento según el siguiente criterio (Arce Jiménez, 2011):

- $R_c 7 \leq 20 \text{ kg/cm}^2$ : Agrietamiento muy leve o imperceptible
- $20 \text{ kg/cm}^2 \leq R_c 7 \leq 30 \text{ kg/cm}^2$ : Agrietamiento de muy leve a leve
- $30 \text{ kg/cm}^2 \leq R_c 7 \leq 40 \text{ kg/cm}^2$ : Agrietamiento de leve a moderado
- $40 \text{ kg/cm}^2 \leq R_c 7 \leq 55 \text{ kg/cm}^2$ : Agrietamiento de moderado a alto
- $R_c 7 \geq 60 \text{ kg/cm}^2$ : Agrietamiento de alto a severo

#### 2.2.4.4.7. Resistencia a flexotracción

La resistencia a flexotracción (llamada también módulo de ruptura) es directamente proporcional a la resistencia a compresión, y su relación varía de 1:5 a 1:10 (resistencia a flexión entre resistencia a compresión). Por lo cual, es conveniente su uso en carreteras, ya que distribuye adecuadamente las cargas a las capas inferiores, asimilando el “efecto de losa” (De la Fuente Lavalle, 2013).

La Figura 21 muestra valores aproximados de su relación con la resistencia a compresión.



**Figura 21 – Resistencia a flexotracción en función de la resistencia a compresión**

Fuente: IECA & CEDEX (2003)



**2.2.4.4.8. Módulo de elasticidad**

Es la relación entre la tensión aplicada y la correspondiente deformación unitaria y, en un pavimento, es un indicativo de la capacidad de distribuir las tensiones hacia capas inferiores y las deflexiones que se originan; siendo mayor la capacidad de distribución y menor las deflexiones a un mayor valor de módulo de elasticidad. Además, un valor bajo de módulo de elasticidad puede producir deformaciones excesivas que afecten a las capas del pavimento aledañas y agrieten el pavimento (IECA & CEDEX, 2003) & (De la Fuente Lavalle, 2013).

Hay que tener en cuenta la diferencia entre el módulo de elasticidad de ensayos estáticos y dinámicos, denominado también módulo resiliente (dando este último mayores valores, entre un 10 y un 15%).

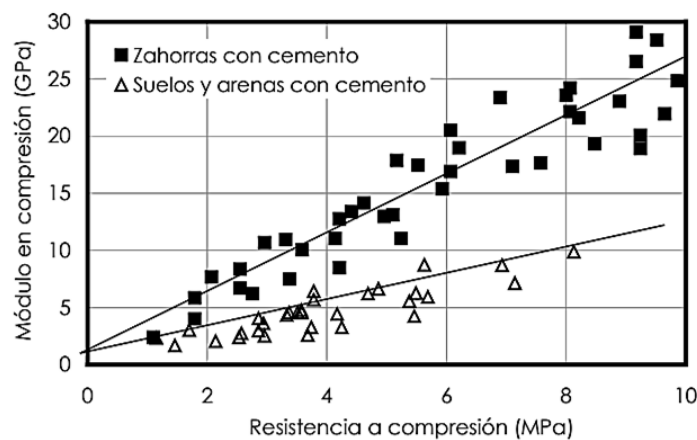


Figura 22 - Módulo de elasticidad (dinámico) en función de la resistencia a compresión

Fuente: IECA & CEDEX (2003)

**2.2.4.4.9. Coeficiente de Poisson**

Se define como la relación entre la deformación lateral y la deformación axial debido a una carga axial (Menéndez Acurio, 2016a).

En la Tabla 13, se muestran valores de coeficiente de Poisson para distintos materiales (Von Quintus & Killingsworth, 1997).

Tabla 13 - Rangos típicos de coeficiente de Poisson

Material	Coeficiente de Poisson
Hormigón asfáltico	0.25 – 0.40
Hormigón de cemento Portland	0.10 – 0.20
Base tratada con asfalto	0.25 – 0.40
Base tratada con cemento	0.15 – 0.25
Bases granulares no consolidadas	0.20 – 0.40
Suelo cohesivo	0.30 – 0.45
Suelo estabilizado con cemento	0.15 – 0.30
Suelo estabilizado con cal	0.20 – 0.35

Fuente: Von Quintus & Killingsworth (1997)

El IECA & CEDEX (2003) menciona que generalmente se suele adoptar, en los cálculos, un valor de 0.25 para materiales granulares o con porcentajes apreciables de grava, pudiendo presentar valores menores.

#### 2.2.4.4.10. Módulo resiliente

El módulo resiliente, o módulo de elasticidad dinámico, es la relación entre la tensión aplicada y la correspondiente deformación unitaria bajo condiciones de carga dinámica.

El ISCYC (2012), hace mención a la aplicación del ensayo de velocidad de pulso ultrasónico para determinar el módulo de elasticidad dinámico de un suelo cemento. En ello, muestra el incremento del módulo de elasticidad dinámico a medida que la resistencia a compresión es mayor.

En la Tabla 14 se observan valores típicos de módulo resiliente para un material tratado con cemento.

**Tabla 14 – Propiedades típicas de un material tratado con cemento**

Propiedad	Evaluado a 7 días
Resistencia a la compresión	300 – 800 psi (2.1 – 5.5 MPa)
Módulo de Ruptura (Resistencia a la flexión)	100 – 200 psi (0.7 – 1.4 MPa)
Módulo de Elasticidad	600,000 – 1,000,000 psi (4,100 – 6,900 MPa)
Coefficiente de Poisson	0.15

Fuente: Garber, Rasmussen, & Harrington (2014)

#### 2.2.4.5. Método del ultrasonido para determinar el módulo resiliente

El método del ultrasonido es un método no destructivo para la determinación de la velocidad de pulso de una onda mecánica de altas frecuencias, superando el sonido audible por el humano (20 KHz) (Pineda V., y otros, 2009), propagados en un medio.

##### I. Velocidad de propagación

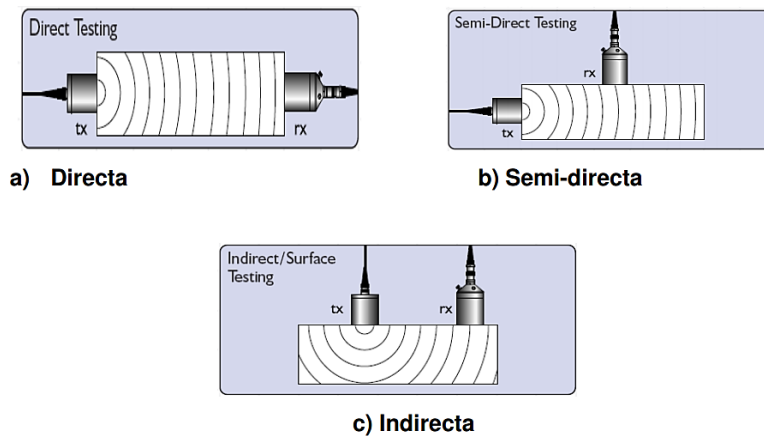
La velocidad de propagación depende de las propiedades del material que se propaga, por ello, este método es utilizado para obtener información sobre uniformidad, cavidades, grietas y defectos, resistencia a compresión y constantes elásticas, como el módulo de elasticidad. La Tabla 15 muestra valores de velocidad de onda longitudinal en concreto y su relación con la resistencia a compresión.

**Tabla 15 - Relación entre medidas de velocidad longitudinal y la calidad del concreto**

Calidad	Velocidad longitudinal (m/s)	Resistencia a compresión aproximada (kg/cm <sup>2</sup> )
Muy pobre	< 2000	
Pobre	2000 a 3000	≤ 40
Ligeramente bueno	3000 a 3500	≤ 100
Bueno	3500 a 4000	≤ 250
Muy bueno	4000 a 4500	≤ 400
Excelente	> 4500	> 400

Fuente: Molero Armenta (2009)

La velocidad de propagación puede determinarse de tres maneras, transmisión directa, transmisión indirecta y transmisión indirecta o superficial, siendo la directa la de mayor sensibilidad y la indirecta la de menor.



**Figura 23 - Tipos de medición de velocidad de pulso ultrasónico**

Fuente: Torres Martínez & Pérez Madera (2011)

## II. Tipos de onda

Una onda produce la oscilación de las partículas discretas de material alrededor de su punto de equilibrio y esto produce principalmente dos tipos de ondas, longitudinales y transversales, las cuales se detallan a continuación (González Ayala, 2011):

- Ondas longitudinales

Se conocen también como ondas de compresión u ondas P (P-waves), porque en su propagación comprimen y distienden el material, además de ser las más veloces.

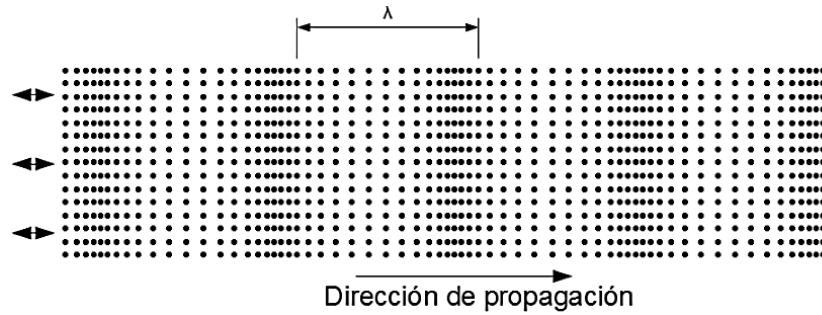


Figura 24 - Ondas longitudinales

Fuente: González Ayala (2011)

- Ondas transversales

Solamente se producen en los sólidos, ya que el esfuerzo de corte es el que permite su propagación, por esta razón se las conoce también con el nombre de onda S (S-waves), ondas de corte o cizallamiento. En este caso el movimiento de las partículas se da en la dirección perpendicular a la de la propagación de la onda y llegan después de las ondas primarias (P-waves).

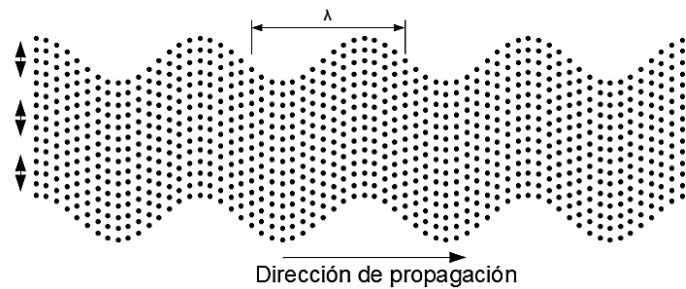


Figura 25 - Ondas transversales

Fuente: González Ayala (2011)

### III. Equipo de pulso ultrasónico

Los componentes de un equipo estándar son un generador de pulso, un par de transductores (transmisor y receptor), un amplificador, un circuito medidor de tiempo, una pantalla (display) de tiempo y cables conectores, como se observa en la Figura 26 (Guerrero Urquilla, Miranda Martínez, & Antonio Ramírez, 2008).

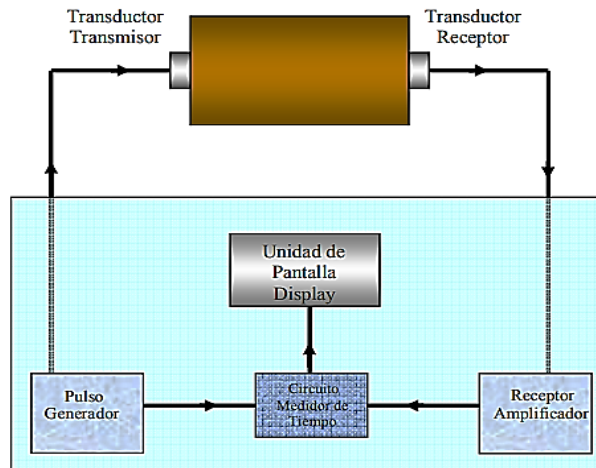


Figura 26 - Funcionamiento del equipo de pulso ultrasónico

Fuente: Guerrero Urquilla, Miranda Martínez, & Antonio Ramírez (2008)

El equipo que se utilizó es el Pundit PL-200 (Figura 27), que permite visualizar inmediatamente los resultados de los ensayos en su pantalla táctil y consta de un software provisto por el fabricante denominado PL-Link que permite la visualización de los datos en un ordenador, su exportación y funciones adicionales correspondientes a las distintas finalidades en las que se puede utilizar el equipo.



Figura 27 - Equipo de pulso ultrasónico Pundit PL-200

Fuente: Proceq SA (2014)

#### IV. Procesamiento de la señal de onda

Una de las formas de determinar la velocidad de propagación del pulso ultrasónico es por medio de la técnica de la detección de la envolvente (Molero Armenta, 2009). Este, nos provee de un gráfico más sencillo para determinar el punto de inicio de la onda y, por ende, la velocidad de propagación.

En el procesamiento de la señal de onda se hace uso de herramientas matemáticas como la Transformada de Fourier, filtros y la Transformada de Hilbert.

- **Transformada de Fourier**

Es una herramienta matemática que nos permite transformar una señal de onda del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

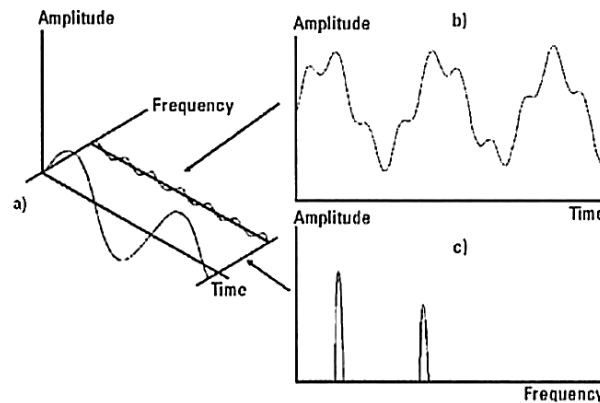


Figura 28 - Relación entre los dominios temporal y frecuencial

Fuente: Begoña Moya (2009)

Para el caso de una señal discreta tenemos (Jiménez Tintaya, 2007):

$$X(f) = \sum_{t=0}^{N-1} x(t)e^{-j2\pi ft/N} \quad (11)$$

Donde:

$X(f)$  : Función en el dominio de la frecuencia

$x(t)$  : Función en el dominio del tiempo

$N$  : Número de impulsos muestrales de la señal discreta

- **Filtrado**

El proceso del filtrado consiste en eliminar, atenuar o amplificar ciertas componentes frecuenciales de una señal (Jiménez Tintaya, 2007).

Los filtros más corrientes son los paso bajo, paso alto, paso banda y rechaza banda (Figura 29).

Los cuales se describen a continuación (Gómez Gutiérrez, 2009):

- Los filtros paso bajo (LP) dejan pasar las frecuencias que están por debajo de una determinada frecuencia.
- Los filtros paso alto (HP) dejan pasar las frecuencias que están por encima de una determinada frecuencia.
- Los filtros paso banda (BP) dejan pasar las frecuencias que están situadas en una determinada banda de frecuencia, es decir, entre dos determinadas frecuencias.

- Los filtros rechazo de banda (BR) dejan pasar todas las frecuencias excepto las que están situadas en una determinada banda de frecuencia, es decir, entre dos determinadas frecuencias  $f_1$  y  $f_2$

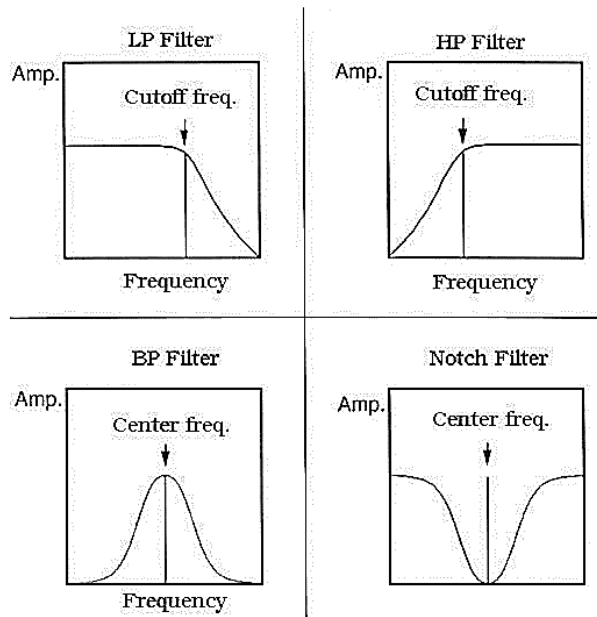


Figura 29 - Tipos de filtros

Fuente: Gómez Gutiérrez (2009)

- **Transformada de Hilbert**

La transformada de Hilbert es otra herramienta matemática importante que permite obtener la envolvente de una señal. Dicha transformada no cambia la representación de la señal de un dominio a otro, sino que simplemente obtiene de ella otra función (Jiménez Tintaya, 2007).

La envolvente de una señal se calcula mediante la obtención previa de la señal analítica (Molero Armenta, 2009):

$$x_a(t) = x(t) + i\tilde{x}(t) \tag{12}$$

Donde:

$x_a(t)$  : Señal analítica

$x(t)$  : Señal original

$\tilde{x}(t)$  : Transformada de Hilbert

y

$$\tilde{x}(t) = H\{x(t)\} = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{x(u)}{\pi(t-u)} du \tag{13}$$

Donde, la envolvente es:

$$A(t) = |x_a(t)| = \sqrt{x^2(t) + \tilde{x}^2(t)} \tag{14}$$

**V. Determinación del módulo resiliente**

Se puede determinar las constantes elásticas de un material en función de la velocidad de propagación de ondas, longitudinales y transversales, a partir de la ecuación elastodinámica o de Lamé, (Molero Armenta, 2009). Esto se muestra en las Tablas 16 y 17.

**Tabla 16 - Relaciones entre velocidades de propagación y las combinaciones de pares de constantes elásticas más usuales**

	$(\lambda, \mu)$	$(E, \mu)$	$(K, \mu)$
$V_L$	$\sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{E}{\rho} \frac{(1 - \nu)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)}}$	$\sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}\mu}{\rho}}$
$V_T$	$\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$	$\sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \nu)}}$	$\sqrt{\frac{\mu}{\rho}}$

Fuente: Molero Armenta (2009)

**Tabla 17 – Ecuaciones de las constantes elásticas a partir de medidas de velocidad**

	$\lambda$	$\mu$	$E$	$\nu$	$K$
$(V_L, V_T)$	$\rho (V_L^2 - 2V_T^2)$	$\rho V_T^2$	$\frac{\rho V_T^2 (3V_L^2 - 4V_T^2)}{V_L^2 - V_T^2}$	$\frac{2V_T^2 - V_L^2}{2V_T^2 - 2V_L^2}$	$\rho (V_L^2 - \frac{4}{3}V_T^2)$

Fuente: Molero Armenta (2009)

**2.2.5. Método de dosificación por compactación y resistencia**

Una de las fases más importantes cuando se trata un suelo con cemento es determinar el contenido adecuado de cemento, para ello, el proceso de dosificación debe sacar el mejor partido posible de los materiales básicos disponibles y conseguir la mayor economía dentro del nivel de calidad fijado. Con tal finalidad el IECA & CEDEX proponen el método de dosificación por compactación y resistencia.

Se trata del procedimiento más habitual para dosificar materiales tratados con cemento para bases y subbases de carreteras. Con este método se combinan los constituyentes, optimizando el cemento, de manera que la mezcla cumpla ciertas condiciones físicas (máxima densidad) y alcance unas determinadas resistencias (IECA & CEDEX, 2003).

El proceso de dosificación, según el IECA & CEDEX (2003), es el siguiente:

- Ajuste de la composición granulométrica
- Determinación del contenido óptimo de agua
- Dosificación del conglomerante
- Dosificación del retardador de fraguado, en caso de ser necesario





## **I. Ajuste de la composición granulométrica**

La composición de la granulometría de los áridos tiene por objeto obtener una combinación de las fracciones de áridos disponibles, después de comprobar que cumplen las características exigidas, de manera que la granulometría conjunta se encuentre dentro de lo especificado en el proyecto.

## **II. Determinación del contenido óptimo de agua**

En los materiales tratados con cemento el agua tiene dos funciones fundamentales:

- Hidratar el cemento.
- Facilitar la compactación de la mezcla.

El procedimiento general, es determinar el contenido de humedad óptimo mediante ensayos de compactación para tres o cuatro contenidos de cemento, aproximados al que cumpla la resistencia requerida. De manera que si tras los ensayos de resistencia, el contenido final de cemento es intermedio entre los estudiados, la humedad óptima final se pueda determinar por interpolación.

## **III. Dosificación del conglomerante**

El contenido final de cemento se obtiene por medio de ensayos de resistencia a compresión, y tiene varias etapas:

- Preparación y curado de las probetas
- Realización de los ensayos de rotura a la edad especificada
- Primera determinación del contenido de conglomerante
- Comprobación de la sensibilidad de la dosificación
- Determinación del plazo de trabajabilidad
- Ajuste final del contenido de conglomerante

### **a. Preparación y curado de las probetas**

La resistencia se debe determinar sobre series de probetas fabricadas y compactadas en laboratorio con el contenido óptimo de agua de compactación y la densidad mínima exigida en obra. Además, el curado se debe realizar preferentemente en cámara húmeda.

- **Cámara húmeda**

La cámara húmeda es el ambiente de temperatura y humedad (relativa) controlada, utilizada para:

- Curar especímenes sensibles a la pérdida de humedad, como es el caso del suelo cemento.
- Mantener condiciones de temperatura estandarizadas, debido a que influyen significativamente en la resistencia a compresión del espécimen.

Si el espécimen es colocado en un ambiente de baja humedad puede alcanzar bajas resistencias, secarse y agrietarse (Swedish Deep Stabilization Research Centre, 2005), así como, si es sometido a bajas temperaturas puede reducir la ganancia de resistencias en el tiempo.

El MTC (2016) menciona que la cámara húmeda debe mantener una temperatura de  $23.0 \pm 1$  °C y una humedad relativa mayor a 96% en el curado de testigos de suelo cemento.

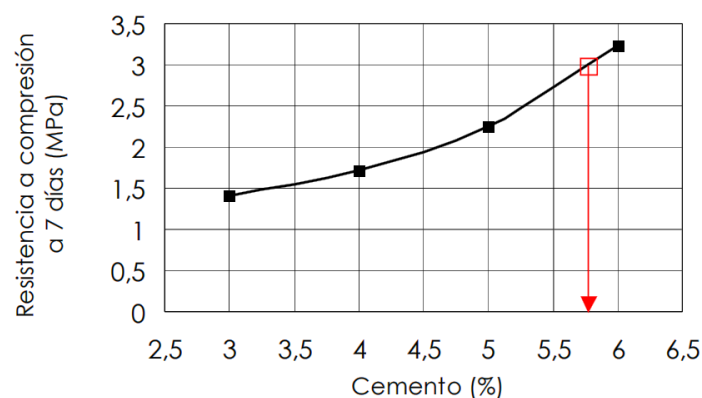
### b. Realización de los ensayos de rotura a la edad especificada

El ensayo de rotura más utilizado en las especificaciones técnicas es el ensayo de resistencia a compresión, ya que tras cortos períodos de curado (7 días o incluso inferiores) proporciona resistencias suficientemente elevadas como para caracterizar y comparar los materiales.

### c. Selección del contenido de cemento

Se representa un gráfico de los valores de las resistencias, a la edad especificada, en función del contenido de cemento y se elige un contenido de cemento teniendo en cuenta las resistencias mínima y máxima.

Lo más recomendable, es escoger un contenido de cemento que proporcione una resistencia algo superior a la mínima especificada (entre un 15 y un 20%) para considerar las caídas de resistencia que se pudieran dar en obra a causa de tolerancias.



**Figura 30 - Determinación del contenido de cemento para suelo cemento (resistencia a compresión a 7 días  $\geq 2,5$  MPa y  $\leq 4,5$  MPa). Se ha escogido el porcentaje de cemento que proporcione una resistencia un 20% superior a la mínima especificada (3,0 MPa)**

Fuente: IECA & CEDEX (2003)

#### d. Sensibilidad de la dosificación

Se debe analizar la sensibilidad de la resistencia, del suelo cemento, frente a pequeñas variaciones en los siguientes parámetros:

- **La densidad de compactación**

Con la dosificación elegida se varía la energía de compactación para obtener probetas compactadas entre el 95% y el 100% (estimados mediante tanteos) de la densidad máxima. Posteriormente, se halla su resistencia y se representa en un gráfico la variación de la resistencia con respecto a la densidad

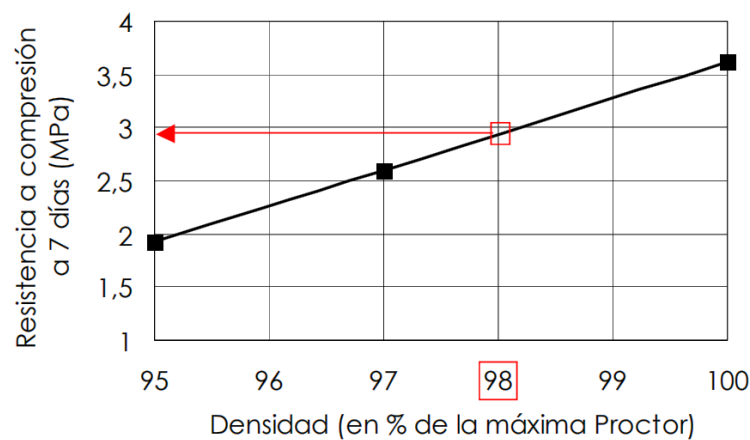


Figura 31 - Variación de la resistencia a compresión con la densidad de compactación

Fuente: IECA & CEDEX (2003)

- **La humedad de compactación**

Se varía la humedad de compactación con respecto a la óptima, fundamentalmente por exceso, ya que las mayores caídas de resistencias se producen en la rama húmeda.

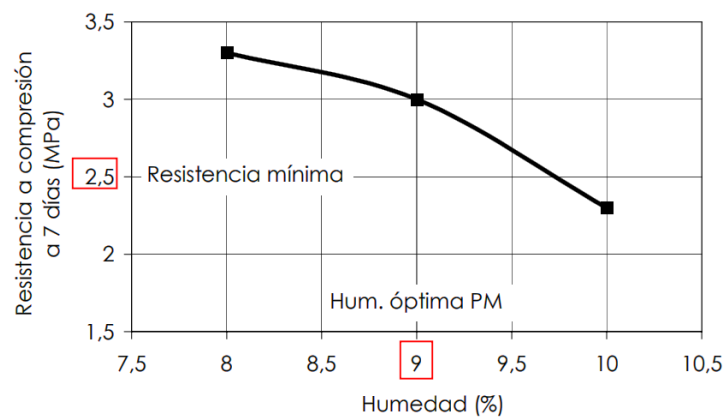


Figura 32 - Variación de la resistencia a compresión con la humedad de compactación

Fuente: IECA & CEDEX (2003)

### e. Determinación del plazo de trabajabilidad

El plazo de trabajabilidad de un material tratado con cemento se define como el tiempo transcurrido a partir de la finalización del proceso de mezclado del material, con las temperaturas que van a prevalecer en obra, durante el cual el fraguado producido es muy escaso, de tal manera que es posible efectuar la compactación del material sin una reducción apreciable de sus propiedades mecánicas finales.

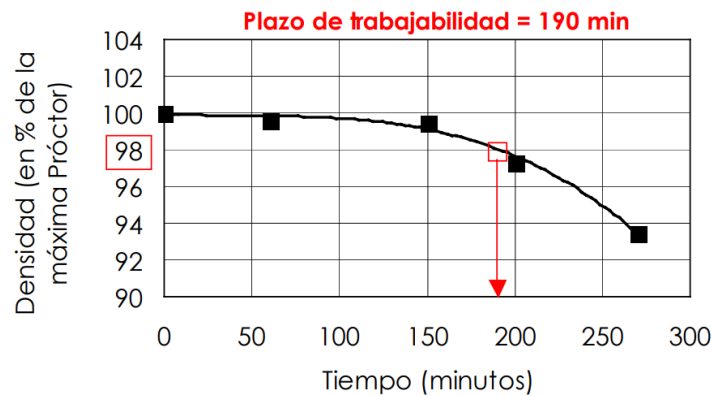


Figura 33 - Determinación del plazo de trabajabilidad de una mezcla con cemento

Fuente: IECA & CEDEX (2003)

### f. Ajuste final de la dosificación

Finalmente, la dosificación se debe ajustar de forma que:

- Para la densidad de referencia exigida en obra, se cumpla la resistencia mínima y máxima prescrita para la mezcla.
- Para pequeñas variaciones en el contenido de humedad, la resistencia del material se mantenga dentro del rango de valores prescritos y el plazo de trabajabilidad sea superior al mínimo especificado.

## 2.2.6. Ensayos para caracterización del suelo

### I. Análisis granulométrico

Según Bowles (1980) el análisis por tamizado de un suelo de grano fino, con más de 4 ó 5% de material más fino que el tamiz No. 200, consta del siguiente procedimiento:

Primero tomamos una cantidad secada al horno de ese suelo, la disgregamos y la lavamos a través del tamiz N° 200. Luego secamos al horno el residuo y lo tamizamos a través de una serie de tamices, constituida dentro de un rango de tamaños que garanticen suficientes puntos para graficar su curva granulométrica.

Este método asegura que muy poco polvo se adhiera a las partículas mayores y que los grumos de material fino ablandados por el agua, se desbaraten y permitan que las partículas de arcilla pasen a través del tamiz y luego del secado las partículas aisladas permanezcan separadas.

El MTC E 107 recomienda una serie de tamices y pesos de muestras, los cuales se muestran en las Tablas 18 y 19 respectivamente.

**Tabla 18 - Serie de tamices alternativos para una gradación de separación uniforme entre los puntos de su gráfica**

Tamiz	Abertura (mm)
3"	75.000
1 ½"	38.100
¾"	19.000
3/8"	9.500
N° 4	4.760
N° 8	2.360
N° 16	1.100
N° 30	0.590
N° 50	0.297
N° 100	0.149
N° 200	0.075

Fuente: MTC (2016)

**Tabla 19 - Peso mínimo de la muestra según el tamaño máximo de sus partículas**

Diámetro nominal de las partículas más grandes mm (pulg)	Peso mínimo aproximado de la porción (gr)
75,0 (3")	5000
50,0 (2")	4000
37,5 (1 ½")	3000
25,7 (1")	2000
19,6 (¾")	1000
9,5 (3/8")	500

Fuente: MTC (2016)

Para poder clasificar el suelo, según la AASHTO, también es necesario tamizar el suelo por los tamices N°10 y N°40.

## II. Límite líquido (LL)

La muestra utilizada es una porción representativa del material pasante del tamiz N° 40, de 150 g a 200 g de material.

El límite líquido, arbitrariamente, se designa como el contenido de humedad al cual el surco separador de dos mitades de una pasta de suelo se cierra a lo largo de su fondo, en una distancia de 13 mm (1/2 pulg), cuando se deja caer la copa 25 veces desde una altura de 1 cm a razón de dos caídas por segundo.

El procedimiento de ensayo por multipunto consiste en realizar la prueba para cierres que requieran de 15 a 35 golpes, disminuyendo la cantidad de golpes necesarios a medida que la mezcla de suelo presenta mayor humedad (MTC, 2016).

### III. Límite plástico (LP)

El límite plástico se ha definido arbitrariamente como el contenido de humedad del suelo al cual un cilindro se rompe o se resquebraja, cuando se enrolla a un diámetro de 3 mm o aproximadamente 3 mm. (Bowles, 1980)

### IV. Clasificación de Suelos

- Sistema de clasificación SUCS

El sistema de clasificación de suelos SUCS clasifica el suelo en función del límite líquido, índice de plasticidad y la gradación del suelo (Menéndez Acurio, 2016a).

El método, utiliza la Carta de Plasticidad (Figura 34) para diferenciar la fracción fina de los suelos y establece criterios para asignar los símbolos y nombres de los grupos. Así como, proporciona una definición completa en función de su granulométrica (ver Apéndice A, pág. 198).

Según el INVIAS (2012b), las clasificaciones de los suelos son las siguientes:

- **Suelos finos:** Son aquellos en los que más de 50 % de su masa seca pasa por el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (N° 200). Se dividen en limos y arcillas (Tablas 20 y 21).

Tabla 20 - Suelos finos: 50% o más pasa el tamiz de 75  $\mu\text{m}$  (N° 200) y límite líquido < 50%

Descripción General	Características	Símbolo del Grupo	Denominación del Grupo
Inorgánico	IP < 4 o bajo la línea A	ML	Limo de baja compresibilidad
	IP > 7 y, simultáneamente, en la línea A o por encima de ella	CL	Arcilla de baja compresibilidad
	$4 \leq \text{IP} \leq 7$ y, simultáneamente, en la línea A o por encima de ella	CL - ML	Arcilla limosa
Orgánico	IP < 4 o bajo la línea A	OL	Limo orgánico
	IP $\geq$ A y, simultáneamente en la línea A o por encima de ella	OL	Arcilla orgánica

Fuente: INVIAS (2012b)

**Tabla 21 - Suelos finos: 50% o más pasa el tamiz de 75 µm (N° 200) y límite líquido ≥ 50%**

Descripción General	Características	Símbolo del Grupo	Denominación del Grupo
Inorgánico	Bajo la línea A	MH	Limo de alta compresibilidad
	En la línea A o por encima de ella	CH	Arcilla de alta compresibilidad
Orgánico	Bajo la línea A	OH	Limo orgánico
	En la línea A o por encima de ella	OH	Arcilla orgánica

$\frac{LL \text{ luego de secado al horno}}{LL \text{ antes de secado}} < 0.75$

Fuente: INVIAS (2012b)

- **Suelos gruesos:** Son aquellos en los que más de 50 % de su masa seca tiene un tamaño mayor que la abertura del tamiz de 75 µm (N° 200). Se dividen en gravas (Tabla 22) y arenas (Tabla 23).

**Tabla 22 - Gravas Más del 50% de la fracción mayor al tamiz de 75 µm (N° 200) queda retenida en el tamiz de 4.75 mm (N° 4)**

Descripción General	Características	Símbolo del Grupo	Denominación del Grupo
Grava con menos de 5 % de finos	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$	GW	Grava bien gradada
	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$	GP	Grava mal gradada
Grava con 5% a 12% de finos limosos	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$	GW – GM	Grava bien gradada con finos limosos
	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$	GP – GM	Grava mal gradada con finos limosos
Grava con 5% a 12% de finos arcillosos o arcillo-limosos	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$	GW – GC	Grava bien gradada con finos arcillosos
	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$	GP – GC	Grava mal gradada con finos arcillosos
Grava con más de 12% de finos	Los limos clasifican como ML o MH	GM	Grava limosa
	Los finos clasifican como CL o CH	GC	Grava arcillosa
	Los finos clasifican como CL-ML	GC – GM	Grava arcillo-limosa

Fuente: INVIAS (2012b)

**Tabla 23 - Arena: 50% o más de la fracción mayor al tamiz de 75 µm (N° 200) pasa el tamiz de 4.75 mm (N° 4)**

Descripción General	Características	Símbolo del Grupo	Denominación del Grupo
Grava con menos de 5 % de finos	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$	GW	Grava bien gradada
	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$	GP	Grava mal gradada
Grava con 5% a 12% de finos limosos	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$	GW – GM	Grava bien gradada con finos limosos
	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$	GP – GM	Grava mal gradada con finos limosos
Grava con 5% a 12% de finos arcillosos o arcillo-limosos	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$	GW – GC	Grava bien gradada con finos arcillosos
	$C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3$	GP – GC	Grava mal gradada con finos arcillosos
Grava con más de 12% de finos	Los limos clasifican como ML o MH	GM	Grava limosa
	Los finos clasifican como CL o CH	GC	Grava arcillosa
	Los finos clasifican como CL-ML	GC – GM	Grava arcillo-limosa

Fuente: INVIAS (2012b)

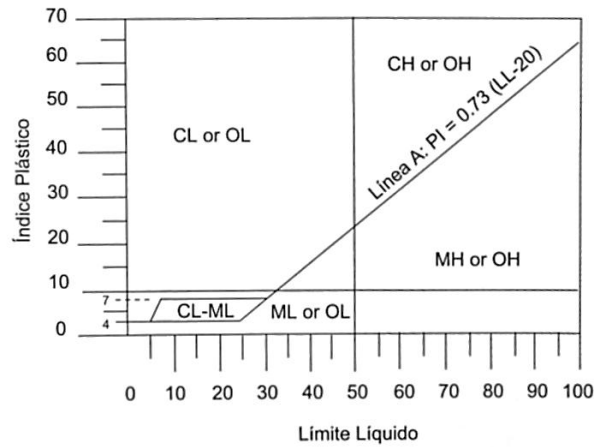


Figura 34 - Carta de Plasticidad

Fuente: Menéndez Acurio (2016a)

- **Sistema de clasificación AASHTO**

Este sistema se usa principalmente en carretas, da un indicativo de la calidad del material para ser empleado como subrasante o base granular y emplea una medida numérica de la calidad del suelo denominada índice de Grupo IG (Menéndez Acurio, 2016a).

El índice de grupo es un parámetro numérico ideado para evaluar cuantitativamente los materiales granulares con arcilla y los materiales limo arcillosos. Este, se determina mediante la ecuación (15) (INVIAS, 2012b).

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

Donde:

$IG$  = Índice de grupo

$F$  = % de material pasante el tamiz N° 200, expresado como un número

$LL$  = Límite líquido

$IP$  = Índice plástico

Para los subgrupos A-2-6 y A-2-7, solo interviene el valor obtenido a través del índice plástico.

De acuerdo con el sistema AASHTO, los suelos se dividen en dos grupos mayores, los granulares y los limo-arcillosos, los cuales, se muestran en las Tablas 24 y 25 (INVIAS, 2012b).



**Tabla 24 - Sistema de clasificación AASHTO suelos granulares**

Materiales granulares (igual o menor al 35% pasante del Tamiz N°200)							
Clasificación del grupo	A-1		A-3	A-2			
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis por tamices							
Tamiz N° 10	50 máx.						
Tamiz N° 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Tamiz N° 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Pasante N° 40							
LL				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
IP	6 máx.		No plástico	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipo de Material	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Grava y arena limosa o arcillosa			
Calidad de capa	Excelente a buena						

Fuente: Menéndez Acurio (2016a)

**Tabla 25 – Sistema de clasificación AASHTO suelos finos**

Materiales arcillosos (más del 35% pasante del Tamiz N°200)				
	A-4	A-5	A-6	A-7
				A-7-5, A-7-6
Análisis por tamices				
Tamiz N° 10				
Tamiz N° 40				
Tamiz N° 200	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Pasante N° 40				
LL	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
IP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipo de Material	Suelos limosos		Suelos arcillosos	
Calidad de capa	Regular a pobre			

Fuente: Menéndez Acurio (2016a)

## V. Ensayo de compactación (Proctor Modificado)

La compactación sirve para determinar la relación entre el contenido de agua y densidad seca de los suelos (curva de compactación) compactados con una energía de compactación modificada (2700 kN-m/m<sup>3</sup> ó 56000 pie-lbf/pie<sup>3</sup>). El MTC (2016) proporciona 3 métodos alternativos (Tabla 26) que se utilizan según la gradación del material.

**Tabla 26 – Métodos de compactación de suelos en laboratorio Proctor Modificado**

Descripción	Método “A”	Método “B”	Método “C”
Uso	Cuando el 20% ó menos del peso del material es retenido en el tamiz 4.75 mm (N° 4)	Cuando más del 20% del peso del material es retenido en el tamiz 4.75 mm (N°4) y 20% ó menos de peso del material es retenido en el tamiz 9.5 mm (3/8”)	Cuando más del 20% en peso del material se retiene en el tamiz 9.5 mm (3/8”) y menos de 30% en peso es retenido en el tamiz 19.0 mm (3/4”)
Material	Se emplea el que pasa por el tamiz de 4.75 mm (N° 4)	Se emplea el que pasa por el tamiz de 9.5 mm (3/8”)	Se emplea el que pasa por el tamiz 19.0 mm (3/4”)
Molde	101.6 mm (4”) de diámetro	101.6 mm (4”) de diámetro	152.4 mm (6”) de diámetro
Número de capas	5	5	5
Golpes por capa	25	25	56

Fuente: Elaboración propia en base al ensayo MTC E 115

## VI. Relación de soporte de california (CBR)

Consiste en los siguientes pasos, según el MTC (2016):

- Elaboración de los especímenes con la humedad óptima y la máxima densidad seca, determinados previamente, compactados a 56, 26 y 12 golpes por capa y 5 capas con el pisón del ensayo Proctor Modificado.
- Inmersión de los especímenes en agua y medición de la expansión.
- Penetración, luego del periodo de inmersión, de los especímenes de suelo, anotando las lecturas de carga para las penetraciones de la Tabla 27.

**Tabla 27 - Penetraciones para lecturas de carga**

Milímetros	Pulgadas
0.63	0.025
1.27	0.050
1.90	0.075
2.54	0.100
3.17	0.125
3.81	0.150
5.08	0.200
7.62	0.300
10.16	0.400
12.70	0.500

Fuente: MTC (2016)

## VII. Absorción del agregado grueso

La absorción del agregado “ $A_b$ ”, es la cantidad de agua presente en el agregado luego de ser sumergido en agua durante 24h. Está dada por:

$$A_b(\%) = \frac{B - A}{A} * 100 \quad (16)$$

Donde:

$A$  : Peso de la muestra seca

$B$  : Peso de la muestra saturada superficialmente seca

En la Tabla 28, se indica la cantidad de material necesario para el ensayo, según el MTC (2016).

**Tabla 28 - Peso mínimo de la muestra de ensayo para determinar su absorción (MTC, 2016)**

Tamaño Máximo Nominal mm (pulg)	Peso Mínimo de la Muestra de Ensayo Kg (lb)
12.5 (1/2) o menos	2 (4,4)
19.0 (3/4)	3 (6,6)
25.0 (1)	4 (8,8)
37.5 (1 1/2)	5 (11)
50.0 (2)	8 (18)
63.0 (2 1/2)	12 (26)
75.0 (3)	18 (40)

Fuente: MTC (2016)

### VIII. Humedad higroscópica

La humedad higroscópica, es la pérdida de peso de una muestra secada al aire cuando se seca posteriormente al horno, expresada como un porcentaje del peso de la muestra secada al horno (MTC, 2016). Se determina mediante la ecuación (17).

$$\% \text{ Humedad Higroscópica} = \frac{W - W_1}{W_1} * 100 \quad (17)$$

Donde:

$W$  : Peso de suelo secado al aire

$W_1$  : Peso de suelo secado en el horno

#### 2.2.7. Ensayos en suelos tratados con cemento

##### I. Ensayo de compactación Relación humedad – densidad (suelo cemento)

Este ensayo de compactación sirve para determinar la relación entre el contenido de agua y densidad seca (curva de compactación) de un suelo adicionado con cemento. Los resultados del ensayo se utilizan para la elaboración de testigos de suelo cemento y para verificar la compactación realizada en campo.

El ensayo se desarrolla según el procedimiento descrito en el ensayo MTC E 1102, con una energía de compactación equivalente a la del ensayo Proctor Modificado. Esto, con finalidad de que los resultados de compactación encontrados en laboratorio sean acordes a los que se pueden alcanzar en campo, utilizando equipo pesado.

##### II. Elaboración de testigos de suelo cemento

Los testigos de suelo cemento se elaboran en base al procedimiento descrito en el ensayo ASTM D 559, con energía de compactación equivalente a la del ensayo Proctor Modificado. Además, según el MTC (2016), el curado se realiza en cámara húmeda a temperaturas de  $23^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$  y una humedad relativa superior al 96%.

Al momento de determinar la cantidad de agua a agregar, Flores Loza (2011), recomienda agregar, adicionalmente, un 5% del total de agua necesaria, debido a la pérdida de humedad durante el mezclado y la compactación.

La PCA (1956) menciona las siguientes tolerancias al momento de elaborar testigos de suelo cemento:

- Contenido de humedad:  $\pm 1\%$  del contenido de humedad óptimo.
- Densidad seca:  $\pm 3 \text{ lb/pe}^3$  ( $0.048 \text{ gr/cm}^3$ ) de la máxima densidad seca.



### III. Resistencia a compresión de testigos de suelo cemento

El ensayo, se realiza en testigos de suelo cemento curados en cámara húmeda y a una edad especificada en el proyecto, usualmente a 7 días. Estos, previamente a la aplicación de la carga, son sumergidos en agua, representando las condiciones más desfavorables en las cuales se puede encontrar.

### IV. Relación de soporte California (CBR) de suelo cemento

El ensayo de CBR se realiza según el procedimiento descrito en el ensayo MTC E 132, y además se incrementa un curado, en cámara húmeda, previo antes de la inmersión y luego del compactado. El IECA (2008) sugiere un curado húmedo de 7 días.

### V. Velocidad de pulso de ultrasonido

Este ensayo permite medir, en laboratorio, la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas en un medio, para la investigación en testigos de suelo cemento, y determinar sus constantes elásticas, como el módulo resiliente.

## 2.3. Hipótesis

### 2.3.1. Hipótesis general

El diseño de un pavimento rígido con subbase tratada, con mínima cantidad de cemento, requiere un espesor de losa de concreto inferior en 2 cm al espesor de losa de concreto de un pavimento rígido con subbase sin tratar.

### 2.3.2. Sub hipótesis

**Sub hipótesis N° 1:** El suelo es de gradación de grano grueso con arcilla según el SUCS y la AASHTO.

**Sub hipótesis N° 2:** Los porcentajes de humedad óptima para el suelo natural y los adicionados con 2%, 4% y 6% de cemento, son  $\leq$  a 9% y las máximas densidades secas son  $\leq$  a 2.20 gr/cm<sup>3</sup>; mediante ensayos de compactación con energía modificada.

**Sub hipótesis N° 3:** Los valores de resistencia a compresión de testigos de suelo-cemento elaborados con 2%, 4% y 6% de cemento, según MTC E 1103, son mayores a 10 kg/cm<sup>2</sup>.



**Sub hipótesis N° 4:** La mínima cantidad de cemento a añadirse para alcanzar una resistencia a compresión de 18 kg/cm<sup>2</sup>, según el método de dosificación por compactación y resistencia, es menor a 4%.

**Sub hipótesis N° 5:** El valor de CBR para el suelo sin tratar es mayor a 20% y para el tratado con mínima cantidad de cemento, es mayor a 100%.

**Sub hipótesis N° 6:** Los valores de módulo resiliente para el suelo sin tratar es mayor a 17,000 psi y para el tratado con mínima cantidad de cemento, es mayor a 600,000 psi.

**Sub hipótesis N° 7:** Los valores de módulo de reacción combinado para subbase de suelo sin tratar y tratado con la mínima cantidad de cemento, de  $e=20$  cm y 10 cm respectivamente, y sobre una subrasante con 6% de CBR son mayores a 10 Mpa/m.

**Sub hipótesis N° 8:** Los espesores de losa de concreto resultantes de diseños para tráfico de 150,000 de ESALs a 7,500,000 de ESALs y con los valores de módulo de reacción combinado determinados, método AASHTO (93), son  $\leq$  a 30 cm.

## 2.4. Definición de variables

### 2.4.1. Variables independientes

X1: Cemento adicionado

Cantidad de cemento adicionado al suelo, en base al peso seco.

X2: Tráfico

Cantidad de vehículos que transitarán en el pavimento rígido durante el periodo de diseño.

#### 2.4.1.1. Indicadores de variables independientes

X1: Cemento adicionado

- Cantidad de cemento (%)

X2: Tráfico

- Cantidad de vehículos (ESALs)



#### 2.4.2. Variables intervinientes

Z1: Clasificación del suelo

Clasificación del suelo en estudio en función de su granulometría, límite líquido e índice de plasticidad.

Z2: Humedad óptima

Contenido de agua, en base al peso seco del suelo, con el que se alcanza la máxima densidad seca en un ensayo de compactación con energía modificada.

Z3: Máxima densidad seca

Densidad seca que se puede alcanzar con el contenido de humedad óptimo en un ensayo de compactación con energía modificada.

Z4: Resistencia a compresión

Valor de resistencia a la compresión de testigos de suelo cemento a edad de 7 días de curado húmedo.

Z5: Mínima cantidad de cemento

Mínima porcentaje de cemento, en base al peso seco, a usarse para tratar el suelo y alcanzar una resistencia a la compresión de 18 kg/cm<sup>2</sup>.

Z6: Valor relativo de soporte (CBR)

Valor relativo de soporte del material sin tratar y el tratado con mínima cantidad de cemento.

Z7: Módulo resiliente

Relación entre la tensión aplicada y la deformación unitaria bajo condiciones de carga dinámica.

Z8: Módulo de reacción combinado

Módulo de reacción de la subrasante combinado con la subbase, sin tratar y tratada con la mínima cantidad de cemento.



#### 2.4.2.1. Indicadores de variables intervinientes

Z1: Clasificación del suelo

- Clasificación (SUCS Y AASHTO)

Z2: Humedad óptima

- Cantidad de agua (%)

Z3: Máxima densidad seca

- Densidad ( $\text{gr}/\text{cm}^3$ )

Z4: Resistencia a compresión

- Cociente de fuerza sobre área ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

Z5: Mínima cantidad de cemento

- Cantidad de cemento (%)

Z6: Valor relativo de soporte (CBR)

- Valor de CBR (%)

Z7: Módulo resiliente

- Valor de módulo resiliente, psi

Z8: Módulo de reacción combinado

- Valor de módulo de reacción, MPa/m

#### 2.4.3. Variables dependientes

Y1: Espesor de losa de concreto

Espesor de la losa del pavimento rígido, diseñado para subbase sin tratar y tratada con mínima cantidad de cemento.

##### 2.4.3.1. Indicadores de variables dependientes

Y1: Espesor de losa de concreto

- Espesor (cm)



2.4.4. Cuadro de operacionalización de variables

Tabla 29 – Cuadro de Operacionalización de Variables

TIPO DE VARIABLE	VARIABLE	DESCRIPCIÓN	NIVEL	INDICADOR	INSTRUMENTOS
Independientes	Cemento Adicionado	Cantidad de cemento adicionado al suelo, en base al peso seco.	2%	Cantidad de cemento, %	Instrumento de cálculo en gabinete
			4%		
	Tráfico	Cantidad de vehículos que transitarán en el pavimento rígido durante el periodo de diseño.	150,000 de ESALs - 7,000,000 de ESALs	Cantidad de vehículos, ESALs	Instrumento de diseño en gabinete
Intervinientes	Clasificación del suelo	Clasificación del suelo en estudio en base a su granulometría y límites de consistencia.	SUCS	Clasificación, SUCS Y AASHTO	Instrumento de clasificación en gabinete
			AASHTO		
	Humedad óptima	Contenido de agua, en base al peso seco del suelo, con el que se alcanza la máxima densidad seca en un ensayo de compactación con energía modificada.	Cantidad de agua	Cantidad de agua, %	Formato de evaluación de laboratorio
	Máxima densidad seca	Densidad seca que se puede alcanzar con el contenido de humedad óptimo en un ensayo de compactación con energía modificada.	Densidad	Densidad, gr/cm3	Formato de evaluación de laboratorio
	Resistencia a la Compresión	Valor de resistencia a la compresión de testigos de suelo cemento a edad de 7 días de curado húmedo.	Resistencia a la compresión	Cociente de fuerza sobre área, kg/cm2	Formato de evaluación de laboratorio
	Mínima cantidad de cemento	Mínima porcentaje de cemento, en base al peso seco, a usarse para tratar el suelo y alcanzar una resistencia a la compresión de 18 kg/cm2.	Cantidad de cemento	Cantidad de cemento, %	Instrumento de diseño en gabinete
	Valor relativo de soporte (CBR)	Valor relativo de soporte del material sin tratar y el tratado con mínima cantidad de cemento.	CBR	Valor de CBR, %	Formato de evaluación de laboratorio
	Módulo Resiliente	Relación entre la tensión aplicada y la deformación unitaria bajo condiciones de carga dinámica.	Módulo Resiliente	Valor de módulo resiliente, psi	Instrumento de cálculo en gabinete
	Módulo de reacción combinado	Módulo de reacción de la subrasante combinado con la subbase, sin tratar y tratada con la mínima cantidad de cemento.	Módulo de reacción combinado	Valor de módulo de reacción, Mpa/m	Instrumento de cálculo en gabinete
Dependientes	Espesor de losa de concreto	Espesor de la losa del pavimento rígido diseñado para subbase sin tratar y tratada con mínima cantidad de cemento.	Espesor de losa de concreto	Espesor, cm	Instrumento de diseño en gabinete