

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL**



TEMA:

***“FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CBR
BASADO EN LAS PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS”
APLICACIÓN A LA CARRETERA: FERNANDO BELAUNDE TERRY-
TRAMO JUANJUI – TOCACHE***

TESIS

Para Optar el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

Hoover Huerta Dextre

LIMA-PERÚ

2005

CONTENIDO

LISTA DE SIMBOLOS	
LISTA DE TABLAS	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
CAPITULO I: INTRODUCCIÓN	3 - 4
1.1 OBJETIVO	3
1.2 ALCANCES	3
CAPITULO II: CONCEPTOS BÁSICOS Y METODOLOGÍA DE ENSAYO	5 - 9
2.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS	5
2.2 LÍMITES DE ATTERBERG	5
2.3 DENSIDAD MÁXIMA Y ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD	6
2.4 CAPACIDAD DE SOPORTE DEL TERRENO (California Bearing Ratio - CBR)	8
CAPITULO III: RELACIÓN ENTRE CONTANTES FÍSICAS Y EL CBR	10 - 23
3.1 RELACION DEL CBR CON LAS CONSANTES FISICAS DE LOS SUELOS	10
3.2 TEORIA DE CORRELACION	11
3.2.1 ESTIMACION DE σ^2, LA VARIANZA DE ϵ.	12
3.2.2 COEFICIENTE DE CORRELACION R².	13
3.2.3 PRUEBA T-STUDENT SIGNIFICATIVA.	14
3.2.4 PRUEBA F (Fisher) - PRUEBA DE LA IDONEIDAD GENERAL DEL MODELO.	15
3.2.5 VERIFICACION DE SUPUESTOS: ANALISIS DE RESIDUALES.	16
3.2.5.1 COMO DETECTAR UN MODELO MAL ESPECIFICADO.	17
3.2.5.2 COMO DETECTAR VARIANZAS DESIGUAL ES.	17
3.2.5.3 COMO DETECTAR LA FALTA DE NORMALIDAD.	
3.2.5.4 COMO DETECTAR DATOS FUERA DE INTERVALO Y OBSERVACIONES CON INFLUENCIA.	19
3.2.5.5 DETECCION DE ERRORES CORRELACIONADOS.	20
CAPITULO IV: APLICACIÓN	24 - 49
4.1 ANALISIS Y COMPARACION DE RESULTADOS DE LAS CORRELACIONES.	24
4.1.1 CBR EN FUNCION DE UNA VARIABLE.	25
4.1.2 CBR EN FUNCION DE VARIAS VARIABLES.	25
4.2 DISEÑO DE AFIRMADO.	27
4.2.1 ALCANCE.	27
4.2.2 DISEÑO DE AFIRMADO DE AGREGADOS EN LOS CAMINOS.	27
a. Procedimiento.	27
b. Las clases de caminos.	28
c. El Índice de Diseño.	28

SUELOS"

d. Vehículos rastreados y Camiones de remolque.	29
e. Índice de diseño.	29
f. Caminos para vehículos rastreados.	29
g. Vida de diseño.	29
h. Criterio de espesores (zona de no heladas).	29
4.2.3 CBR DE DISEÑO PARA LOS MATERIALES SELECTOS Y SUB BASE.	30
4.2.4 CONSIDERACIONES DE ZONA DE HELADAS.	30
a. Requerimiento de espesores.	30
b. Capas en la selección del pavimento.	31
c. Capa de rodadura.	31
d. Capa base.	31
e. Sub base.	31
f. Compactación.	32
g. Espesor de capa base y capa filtro.	32
h. Diseño alternativo.	32
4.2.5 REQUISITOS DE CAPA DE AFIRMADO.	32
a. Zona Nonfrost.	32
b. Zonas de heladas.	33
4.2.6 REQUISITOS DE COMPACTACIÓN.	33
4.2.7 REQUISITOS DE DRENAJE.	34
4.2.8 REQUISITOS DE MANTENIMIENTO.	34
4.2.9 CALCULO DE ESPESORES DEL PAVIMENTO.	35
CAPITULO V: EVALUACIÓN ECONÓMICA.	50 - 51
CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	52 - 53
ANEXOS:	
ANEXO I: PERFILES ESTRATIGRAFICOS	
ANEXO II: RESUMEN DE DATOS DE LABORATORIO	
ANEXO III: SALIDAS DEL - MINITAB R13.	
GLOSARIO	
BIBLIOGRAFÍA	

CAPITULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETIVO

El objetivo del presente estudio es estimar la capacidad de soporte del material de subrasante, (CBR), basado en las propiedades físicas de los suelos (granulometría, límites de Atterberg, densidad máxima seca y óptimo contenido de humedad); mediante correlaciones matemáticas y estadísticas, basadas en resultados de ensayos de laboratorio en proyectos viales. Para este fin, se hace uso de información proveniente de la carretera Juanjui – Tocache, ubicada en el Departamento de San Martín.

Las fórmulas obtenidas de las correlaciones matemáticas se aplican y comparan en el diseño de pavimentos flexibles a nivel de afirmado utilizando el método del "DESIGN OF AGGREGATE SURFACED ROADS AND AIRFIELDS" perteneciente al "Department of the Army" de los Estados Unidos de Norteamérica.

1.2 ALCANCES

En el proyecto de la carretera Juanjui - Tocache, el cual estuvo a cargo de la oficina de apoyo tecnológico del MTC, se realizaron alrededor de 150 ensayos de CBR y 1500 ensayos de propiedades mecánicas de los suelos de subrasante y de canteras, de los cuales se seleccionaron los más representativos para realizar el presente tema de investigación.

Los resultados de los ensayos de laboratorio son de propiedad del Ministerio de Transporte - Oficina de Apoyo Tecnológico, por tal motivo solo presentamos los resúmenes de resultados en el anexo II de esta tesis. Se incluyen el número de registro de los datos, la fecha de realización, Ingenieros y técnicos encargados.

De los resultados obtenidos en laboratorio se puede establecer que los materiales que conforman la sub-rasante presentan la siguiente distribución:

- SUB TRAMO I: JUANJUI – CAMPANILLA

SUELOS	89,93%
• Gravas	10,54%
• Arenas	8,75%
• Finos	70,64%
AFLORAMIENTOS ROCOSOS	10,07%

"FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CBR A PARTIR DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS"

Como se observa se tiene un mayor porcentaje de suelos finos de los cuales se tiene una predominancia de: CL (arcillas limosas) con algunas presencias de suelos del tipo ML, CH, MH y OH en el sistema de clasificación SUCS.

- SUB TRAMO II: CAMPANILLA - PIZARRON

SUELOS	82,82%
• Gravas	18,14%
• Arenas	10,23%
• Finos	54,45%

AFLORAMIENTOS ROCOSOS	17,18%
------------------------------	---------------

En este segundo tramo también encontramos un gran porcentaje de suelos finos como material de subrasante. Dentro de estos suelos finos encontramos: CL (arcillas limosas) como materia predominante.

- SUB TRAMO III: PIZARRON – PUENTE PIZANA

SUELOS	97,44%
• Gravas	32,07%
• Arenas	24,55%
• Finos	40,82%

AFLORAMIENTOS ROCOSOS	2,56%
------------------------------	--------------

- SUB TRAMO IV: TOCACHE – PUENTE PIZANA

SUELOS	99,44%
• Gravas	30,59%
• Arenas	8,03%
• Finos	60,82%

AFLORAMIENTOS ROCOSOS	0,56%
------------------------------	--------------

Los perfiles estratigráficos de los cuatro tramos se presentan en el anexo I.

Como se podrá observar se tiene una gran predominación de suelos finos como parte conformante del material de subrasante, de las cuales se pueden mencionar la presencia de material tipo CL, ML, CH y OH en la clasificación SUCS y suelos del tipo A-4, A-6 y A-7 en la clasificación AASHTO.

CAPITULO II: CONCEPTOS BÁSICOS Y METODOLOGÍA DE ENSAYO

En este capítulo describiremos los procedimientos de trabajo realizados en laboratorio(OAT-MTC), en base a las normas del MTC y ASTM, que se utilizaron en la obtención de la granulometría de suelos, constantes físicas, Próctor y CBR.

2.1 ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS

Es la división del suelo en diferentes fracciones, seleccionadas por el tamaño de sus partículas componentes; las partículas de cada fracción se caracterizan porque su tamaño se encuentra comprendido entre un valor máximo y un valor mínimo, en forma correlativa para las distintas fracciones, de tal modo que el máximo de una fracción es el mínimo de la que le sigue correlativamente. La separación de cada fracción se hace sencillamente por mallas, cuando es posible el cribado, pero en suelos de grano fino por un proceso de sedimentación en agua.

Este Modo Operativo está basado en las Normas ASTM D 422 y MTC E 107- 2000. En la tabla N°1 se clasifica el material según su tamaño.

2.2 LÍMITES DE ATTERBERG

El suelo de grano fino puede existir en uno de los cinco estados que depende del contenido de agua.

Según el contenido de agua decreciente, un suelo fino puede estar en cualquiera de los siguientes estados de consistencia, definidos por Atterberg:

- ◇ *Estado Líquido*, con las propiedades y apariencia de una suspensión.
- ◇ *Estado Semilíquido*, con las propiedades de un fluido viscoso.
- ◇ *Estado Plástico*, en que el suelo se comporta plásticamente.
- ◇ *Estado semisólido*, en que el suelo tiene la apariencia de un sólido, pero aun disminuye de volumen si se sigue secando.
- ◇ *Estado sólido*, en que el volumen del suelo ya no varía con secado.

El modo operativo para la determinación del límite líquido de los suelos esta dada por el ASTM D 4318 y el MTC E 110 – 2000. Para la determinación del Límite Plástico nos basamos en la metodología descrita por el ASTM D 4318 y MTC E 111 – 2000.

Se puede definir el índice de plasticidad de un suelo como la diferencia entre su límite líquido y su límite plástico.

$$L.P. = L.L. - L.P.$$

donde:

L.L. = Límite Líquido

L.P. = Límite Plástico

L.L. y L.P., son números enteros.

2.3 DENSIDAD MÁXIMA Y ÓPTIMO CONTENIDO DE HUMEDAD

Próctor visualizó la correlación entre el resultado de un proceso de compactación y el aumento de su densidad seca del material compactado, y estableció la costumbre, que aun hoy se sigue, de juzgar los resultados de un proceso de compactación con base en la variación de la densidad seca que se logre; también comprendió el fundamental papel que desempeñó el contenido de agua del suelo en la compactación que de él se obtiene, con cierto procedimiento. Juntando estos dos aspectos, que se consideró básicos, estableció la costumbre, de la marcha de un proceso de compactación por medio de una gráfica en la que se haga ver el cambio de la densidad seca al compactar el suelo con diversos contenidos de agua, utilizando varias muestras del mismo suelo, cada una de las cuales proporciona un punto de la curva. Como quiera que diferentes procesos de compactación producen al mismo suelo compactaciones distintas, un mismo suelo podrá tener diversas curvas de compactación, correspondientes a los diferentes modos de compactarlo que puede usarse.

2.3.1 COMPACTACIÓN DE SUELOS EN LABORATORIO UTILIZANDO UNA ENERGÍA MODIFICADA (56 000 pie-lb/pie³ [2 700 kN-m/m³]) - MTC E 115 – 2000 / ASTM D 1557.

Se proporciona 3 métodos alternativos. El método usado debe ser indicado en las especificaciones del material a ser ensayado. Si el método no está especificado, la elección se basará en la gradación del material.

2.3.1.1 METODO "A"

- Molde.- 4 pulg. de diámetro (101,6mm)
- Material.- Se emplea el que pasa por el tamiz N° 4 (4,75 mm).

- Número de Capas.- 5
- Número de Golpes por capa.- 25
- Uso.- Cuando el 20% ó menos del peso del material es retenido en el tamiz N° 4 (4,75 mm).
- Otros Usos.- Si el método no es especificado; los materiales que cumplen éstos requerimientos de gradación pueden ser ensayados usando Método B ó C.

2.3.1.2 METODO "B"

- Molde.- 4 pulg. (101,6 mm) de diámetro.
- Materiales.- Se emplea el que pasa por el tamiz de 3/8 pulg. (9,5 mm).
- Número de Capas.- 5.
- Número de Golpes por capa.- 25.
- Usos.- Cuando más del 20% del peso del material es retenido en el tamiz N° 4 (4,75 mm) y 20% ó menos de peso del material es retenido en el tamiz 3/8 pulg. (9,5 mm).
- Otros Usos: Si el método no es especificado, y los materiales entran en los requerimientos de gradación pueden ser ensayados usando Método C.

2.3.1.3 METODO "C"

- Molde.- 6 pulg. (152,4mm) de diámetro.
- Materiales.- Se emplea el que pasa por el tamiz ¾ pulg. (19,0 mm).
- Número de Capas.- 5
- Número de Golpes por Capa.- 56
- Uso.- Cuando más del 20% en peso del material se retiene en el tamiz 3/8 pulg. (9,53 mm) y menos de 30% en peso es retenido en el tamiz ¾ pulg. (19,0 mm).
- El molde de 6 pulgadas (152,4 mm) de diámetro no será usado con los métodos A ó B.

Nota 1:

- Los resultados tienden a variar ligeramente cuando el material es ensayado con el mismo esfuerzo de compactación en moldes de diferentes tamaños.
- Si el espécimen de prueba contiene más de 5% en peso de fracción extradimensionada (fracción gruesa) y el material no será incluido en la prueba se deben hacer correcciones al Peso Unitario y Contenido de Agua del espécimen de ensayo ó la densidad de campo usando el método de ensayo ASTM D-4718.
- Esfuerzo Modificado.- Es el término aplicado para el esfuerzo de compactación de 56 000 lb-pie/pie³ (2 700 kN-m/m³) aplicado por el equipo y procedimientos de este ensayo.
- Máximo Peso Unitario Seco Modificado, $\gamma_{m\acute{a}x}$ (lb/pie³ ó kN/m³), el máximo valor definido por la curva de compactación del ensayo usando el esfuerzo modificado.
- Óptimo Contenido de Humedad Modificado, $w_o(\%)$.- Es el contenido de agua al cual el suelo puede ser compactado al máximo Peso Unitario Seco usando el esfuerzo de Compactación Modificada.

2.4 CAPACIDAD DE SOPORTE DEL TERRENO (California Bearing Ratio - CBR)

Este *índice* se utiliza para evaluar la capacidad de soporte de los suelos de subrasante y de las capas de base, subbase y de afirmado.

El procedimiento es tal que los valores de la relación de soporte se obtienen a partir de especímenes de ensayo que posean el mismo peso unitario y contenido de agua que se espera encontrar en el terreno. En general, la condición de humedad crítica (más desfavorable) se tiene cuando el material está saturado. Por esta razón, el método original del Cuerpo de Ingenieros de E.U.A. contempla el ensayo de los especímenes después de estar sumergidos en agua por un período de cuatro (4) días confinados en el molde con una sobrecarga igual al peso del pavimento que actuará sobre el material.

Este procedimiento de ensayo está basado en las Normas ASTM D 1883, AASHTO T 193 y MTC E 132 – 2000.

**"FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CBR A PARTIR DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS
SUELOS"**

TABLA N° 2.1: CLASIFICACIÓN DE SUELOS SEGÚN SU TAMAÑO

MATERIAL	TAMAÑO
Bolonería	Mayor de 12"
Cantos Rodados	Entre 3" y 12"
Gravas	Entre 4.76 mm y 3"
Arenas	Entre 0.074 mm y 4.76 mm
Finos(Limos y Arcillas)	Menor de 0.074 mm

CAPITULO III: RELACIÓN ENTRE CONSTANTES FÍSICAS Y EL CBR

Podríamos afirmar que la capacidad de soporte del suelo, CBR, depende directa e indirectamente de una serie de parámetros; así, el aumento en el porcentaje de finos (<N200) de los suelos implica una disminución de la capacidad de soporte de este; la plasticidad alta de suelos principalmente finos nos indican una baja capacidad de soporte; a valores altos de la Máxima Densidad Seca se espera valores de CBR altos, etc.

Para obtener una ecuación matemática que nos ayude a inferir valores de CBR, como función de las constantes físicas, granulometría, etc., es necesario realizar algunos supuesto o hipótesis que nos ayudaran a comprobar la forma de dependencia o no de la Granulometría, constantes físicas, MDS y OCH con el CBR. Estos supuestos y las metodologías a emplear para obtener las ecuaciones matemáticas se tratarán en el presente capítulo.

3.1 RELACIÓN DEL CBR CON LAS CONSTANTES FÍSICAS DE LOS SUELOS

Asumiremos la hipótesis de que el CBR es una función de una o varias de las otras propiedades mecánicas de los suelos. Tomando en cuenta esta hipótesis, se propone algunas leyes de regresión, las cuales se traducen en modelos matemáticos o ecuaciones que nos permitirán estimar un parámetro de diseño, el CBR, a partir del conocimiento de otras propiedades mecánicas del suelo (Límites de Atterberg, Densidad Máxima, etc.).

En general una relación funcional queda expresada de la siguiente manera:

$$Y = f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n) \quad (3.1)$$

Donde Y es la variable dependiente, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ son las variables independientes.

Como ejemplo podemos plantear la siguiente relación:

$$\text{CBR} = f(\text{MDS}, \text{IP}, \text{LL}) \quad (3.2)$$

Evidentemente, muchas otras relaciones pueden ser planteadas, en función de una o varias variables. Los dos modelos adoptados tienen, como expresiones matemáticas generales, las siguientes:

$$Y = A + B(x_1) + C(x_2) + D(x_3) \quad (3.3)$$

y

$$Y = a(x_1)^b (x_2)^c (x_3)^d \quad (3.4)$$

Por ejemplo

$$\text{CBR} = A + B(\text{MDS}) + C(\text{IP}) \quad (3.5)$$

$$\text{CBR} = a(\text{MDS})^b (\text{IP})^c \quad (3.6)$$

Donde A, B, C, D... y a, b, c,... son parámetros estimados mediante los términos de regresión (métodos de mínimos cuadrados), que explicaremos en el siguiente ítem.

La ecuación (3.6) se puede transformar, tomando logaritmos a ambos miembros, a una ecuación de la forma (3.5); la ecuación entonces sería:

$$\begin{aligned} \ln(CBR) &= \ln(a) + b\ln(MDS) + c\ln(IP) & (3.6.i) \\ y &= A + Bx_1 + Cx_2 \end{aligned}$$

Los modelos matemáticos de la forma (3.5) y (3.6) se denominan **modelos lineales generales** pues, el modelo, es una función lineal de los parámetros A, B, C,... La teoría de correlación utilizada en esta investigación está basada en modelos lineales.

3.2 TEORÍA DE CORRELACIÓN

El modelo lineal a analizar será el siguiente:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k + \epsilon \quad (3.7)$$

Donde x_1, x_2, \dots, x_k podrían representar en realidad los cuadrados, cubos, logaritmos u otras funciones de las variables de predicción, $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ son los parámetros a estimar y ϵ es un error aleatorio.

Para la aplicación del método de mínimos cuadrados asumiremos lo siguiente:

"SUPUESTO I: La media de la distribución de probabilidad de ϵ es 0. Es decir, la media de los errores a lo largo de una serie de infinitamente larga de experimentos es 0 para cada valor de la variable independiente x . Este supuesto nos indica que el valor medio de y , $E(y)$, para un valor dado de x es:

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2 + \dots + \beta_kx_k \quad (3.8)$$

SUPUESTO II: La varianza de la distribución de probabilidad de ϵ es constante para todos los valores de la variable independiente x . En el caso de nuestro modelo, este supuesto significa que la varianza de ϵ es igual a una constante, digamos σ^2 , para todos los valores de x .

SUPUESTO III: La distribución de probabilidad de ϵ es normal.

SUPUESTO IV: Los errores asociados a cualesquier dos observaciones distintas son independientes. Es decir, el error asociado a un valor de y en particular no tiene efecto alguno sobre los errores asociados a otros valores de y .

El método de mínimos cuadrados es una técnica de estimación válida incluso cuando se violan uno o más de los supuestos.¹

Generalizando la metodología de los mínimos cuadrados aplicaremos el álgebra de matrices al análisis de regresión, para ello, es preciso acomodar los datos en matrices siguiendo un patrón específico.

Supondremos que hemos recabado "n" puntos de datos, es decir, "n" valores de Y y los valores correspondientes de x_1, x_2, \dots, x_k , y que estos se denotan como se muestra en la tabla N° 3.1. Entonces, las dos matrices de datos **Y** y **X** son como se muestra en el recuadro.

Las matrices de datos Y y X, la matriz β y la matriz de error

$$Y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1k} \\ 1 & x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2k} \\ 1 & x_{31} & x_{32} & \dots & x_{3k} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ 1 & x_{n1} & x_{n2} & \dots & x_{nk} \end{bmatrix} \quad \hat{\beta} = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \vdots \\ \beta_k \end{bmatrix} \quad \varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix}$$

Obsérvese que la primera columna de la matriz **X** es una columna de unos. Por tanto, estamos insertando un valor de x, específicamente x_0 , como coeficiente de β_0 , donde x_0 es una variable que siempre es igual a 1. En consecuencia, hay una columna en la matriz **X** para cada parámetro β . Además, recuerde que un punto de datos en particular se identifica mediante filas específicas de las matrices **Y** y **X**. Con esta notación, el modelo lineal general se puede expresar en forma de matriz como:

$$Y = X\beta + \varepsilon$$

La matriz $\hat{\beta}$ que se muestra en el recuadro contiene las estimaciones de mínimos cuadrados (que estamos tratando de obtener) de los coeficientes $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ del modelo lineal (ecuación 3.7).

Con el álgebra de matrices se podrá demostrar que:

$$\hat{\beta} = [(X'X)^{-1}X']Y \tag{3.9}$$

¹ William Mendenhall - Terry Sincich; Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencia.; Pag. 535 - 536

La matriz β obtenida con (3.9) contiene las estimaciones de mínimos cuadrados de los coeficientes $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ del modelo lineal (ecuación 3.7).

3.2.1 ESTIMACION DE σ^2 , LA VARIANZA DE ϵ

Puesto que σ^2 casi nunca se conoce por adelantado, debemos utilizar los datos de muestra para estimar su valor:

$$s^2 = \frac{SSE}{n - \text{número de parámetros en el modelo}}$$

donde :

$$SSE = Y'Y - \hat{\beta}X'Y$$
(3.10)

En la referencia número 3 pag. 614-615 se demuestra que $E(s^2) = \sigma^2$, es decir que s^2 es un estimador insesgado de σ^2 . $E(s^2)$ es el valor medio de s^2 . Esta observación nos permite utilizar s^2 en lugar de σ^2 .

3.2.2 COEFICIENTE DE CORRELACION "R²"

El coeficiente de correlación o coeficiente de determinación es una cantidad estadística que mide que tan bien el modelo se ajusta a los datos.

Así, pues definimos el coeficiente de determinación múltiple de muestra R^2 como:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2} = 1 - \frac{SSE}{SS_{yy}} = \frac{\sum (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2}{\sum (y_i - \bar{y}_i)^2}$$

donde : $SSE = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2, SS_{yy} = \sum (y_i - \bar{y}_i)^2$

(3.11)

Donde \hat{y}_i es el valor predicho de y_i con el modelo. R^2 es una estadística de muestra que representa la fracción de la variación de los valores de y de la muestra (medida por S_{yy}) que se puede atribuir al modelo de regresión. Por tanto, $R^2 = 0$ implica que el modelo no se ajusta en absoluto a los datos y $R^2 = 1$ implica un ajuste perfecto, es decir, que el modelo pasa por todos y cada uno de los puntos de datos. En general, cuanto mayor sea el valor de R^2 , mejor se ajustará el modelo a los datos.

Como alternativa al uso de R^2 como medida de la idoneidad de un modelo, se utiliza el **coeficiente de determinación múltiple ajustado**, denotado por R^2_a , pues el valor de R^2 aumenta conforme se agrega más variables al modelo. En consecuencia, obligaremos a R^2 a adoptar un valor muy cercano a 1 aunque el

modelo no contribuya con información a la predicción de y . De hecho, R^2 es igual a 1 cuando el número de términos del modelo es igual al número de puntos de datos.

$$R_a^2 = 1 - \frac{(n-1)}{n-(k+1)} \left(\frac{SSE}{SS_{YY}} \right) = 1 - \frac{n-1}{n-(k+1)} (1 - R^2) \quad (3.12)$$

A diferencia de R^2 , R_a^2 , toma en cuenta tanto el tamaño de la muestra "n" como el número de parámetros β del modelo. R_a^2 , siempre es menor que R^2 y, lo que es más importante, no puede "forzarse" hacia 1 con solo agregar más y más variables independientes al modelo. Por ello, algunos analistas prefieren el valor más conservador de R_a^2 cuando deben elegir una medida de la idoneidad de un modelo. Hay que tener presente que tanto R^2 como R_a^2 son estadísticas de muestra, **y que no debemos depender únicamente de sus valores para decidir si un modelo es útil o no para predecir y**. Utilice la prueba F (apoyándose en una medida de confiabilidad α) para hacer inferencias acerca de la idoneidad global del modelo de regresión múltiple.

3.2.3 PRUEBA T-STUDENT SIGNIFICATIVA

Analizaremos el modelo lineal simple (de una sola variable):

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \quad \dots\dots\dots (3.13)$$

La pregunta que nos haremos es ¿x (variable independiente) contribuye con información al modelo? Si x no contribuye con información al modelo la media de y, es decir, la parte determinística del modelo $E(y) = \beta_0 + \beta_1 x$ no cambia cuando x cambia. Sea cual sea el valor de x, el valor predicho de y será el mismo. En el modelo en análisis (3.13), esto nos indicaría que el verdadero valor de β_1 es igual a 0. Por tanto, si queremos probar la hipótesis nula de que x no contribuye con información a la predicción de y, contra la hipótesis alternativa de que estas variables tienen una relación lineal con una pendiente distinta de cero, probaremos:

$$H_0 : \beta_1 = 0$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0$$

Si los datos apoyan la hipótesis alternativa, concluiremos que x si contribuye con información a la predicción de y empleando el modelo. Por tanto, esta es, en cierta medida, una prueba de la utilidad del modelo de hipótesis.

Puesto que σ casi nunca se conoce, la estadística de prueba apropiada generalmente es una estadística t de Student que se forma como sigue:

Prueba de utilidad del modelo: Regresión lineal simple

Prueba de una sola cola	Prueba de dos colas
$H_0 : \beta_1 = 0$	$H_0 : \beta_1 = 0$
$H_a : \beta_1 < 0$	$H_a : \beta_1 \neq 0$
<i>o.sea</i> , $H_a : \beta_1 > 0$	
Estadística de prueba: $t = \frac{\hat{\beta}_1}{s_{\beta_1}} = \frac{\hat{\beta}_1}{\frac{s}{\sqrt{SS_{xx}}}}$	
Región de rechazo: $t < -t_\alpha$	Región de rechazo: $ t > t_{\alpha/2}$
$(\text{o } t > t_\alpha)$	

donde t_α y $t_{\alpha/2}$ se basan en (n-2) gl. Los valores de t_α tales de que $P(t > t_\alpha) = \alpha$ se extraen de tablas de "percentilas (t_p) de la distribución de t de Student con v grados de libertad". Estas tablas se obtienen del apéndice D de la referencia Nª 4 o de la tabla Nª 7 del apéndice II de la referencia Nª 3.

Cabe observar que no realizamos la prueba a β_0 pues en un modelo lineal no es de importancia.

La realización de pruebas t para cada parámetro β de un modelo que tiene muchos términos no es una buena forma de determinar si el modelo contribuye con información a la predicción de y. Si realizamos una serie de pruebas t para determinar si las variables independientes están contribuyendo a la relación de predicción, es muy probable que cometiéramos uno o dos errores al decidir cuales términos conservar en el modelo y cuales deben excluirse. Así pues, en los modelos de regresión múltiple en los que esta considerado un buen número de variables independientes, la realización de una serie de pruebas t podría incluir un gran número de variables insignificantes y excluir algunas que si son útiles.

3.2.4 PRUEBA F (FISHER) – PRUEBA DE LA IDONEIDAD GENERAL DEL MODELO

La prueba:

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

H_a : Por lo menos uno de los parámetros $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ es distinto de cero

Evaluará formalmente la utilidad global del modelo. La estadística de prueba que se usará para probar esta hipótesis nula es:

Estadística de prueba: $F = \text{Cuadrado medio del modelo} / \text{Cuadrado medio del error}$

Donde "n" es el número de puntos de datos, k es el número de parámetros en el modelo (sin incluir β_0). Según la hipótesis nula, esta estadística de prueba F tiene una distribución de probabilidad F con k gl (grados de libertad) en el numerador y (n-(k+1)) gl en el denominador. Los valores del extremo de la distribución F se obtienen de las tablas 9-12 del apéndice II de la referencia N° 3.

Por tanto, la estadística de prueba F aumenta en valor con forme el coeficiente de determinación R^2 . Para determinar que tan grande debe ser F antes de poder llegar a la conclusión, con un valor dado de α , de que el modelo es útil para predecir y, establecemos la región de rechazo como sigue:

Región de rechazo: $F > F_\alpha$

Donde:

$$v_1 = k \text{ gl}; v_2 = n - (k + 1) \text{ gl}$$

Este procedimiento de prueba se resume en siguiente recuadro:

La prueba F de análisis de varianza: Prueba de la idoneidad general del modelo

$$E(y) = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 \dots + \beta_k x_k$$

$$H_0 : \beta_1 = \beta_2 = \dots = \beta_k = 0$$

H_a : Por lo menos uno de los parámetros $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_k$ es distinto de cero

Estadística de prueba:

$$F = \frac{R^2 / k}{(1 - R^2) / [n - (k + 1)]}$$

= Cuadrado medio del modelo/Cuadrado medio del error

$$= \frac{SS(\text{Modelo})}{SSE / [n - (k + 1)]}$$

Región de rechazo: $F > F_\alpha$ donde $\nu_1 = k$ y $\nu_2 = [n - (k + 1)]$

3.2.5 VERIFICACIÓN DE SUPUESTOS: ANALISIS DE RESIDUALES

Un análisis de residuales, esto es las diferencias $(y - \hat{y})$ entre los valores de y y los correspondientes valores predichos, a menudo proporcionan información que nos permite modificar y mejorar un modelo de regresión. Estas modificaciones pueden hacerse por cualquiera de tres razones: (1) el componente determinístico del modelo no se especificó correctamente, (2) se violan uno o más de los supuestos acerca de ε y (3) los datos empleados para ajustar el modelo contienen uno o más valores fuera de lo común.

Un residual de la regresión se define como la diferencia entre un valor observado de y y el valor predicho correspondiente.

$$\text{Residual} = y - \hat{y}$$

3.2.5.1 COMO DETECTAR UN MODELO MAL ESPECIFICADO: Un método para analizar los residuales en un análisis de regresión consiste en graficar el valor de cada residual contra el valor correspondiente de la variable independiente x . Si el modelo contiene más de una variable independiente, se trazará una gráfica por cada una de dichas variables. Esta gráfica ayuda a detectar si hemos especificado mal el componente determinístico del modelo.

Verificar si un modelo está o no mal especificado equivale a comprobar gráficamente el supuesto de que $E(\epsilon) = 0$.

3.2.5.2 COMO DETECTAR VARIANZAS DESIGUALES

La gráfica de los residuales también puede servir para verificar el supuesto de que la varianza del error es constante. Una gráfica de los residuales contra la variable independiente x puede exhibir un patrón como el que se aprecia en la figura N° 1. En la figura, el intervalo de valores de los residuales aumenta al aumentar x , lo que indica que la varianza de la variable de respuesta y crece al aumentar el valor de x . Las gráficas de residuales como la que se muestra en la figura N° 1 no son inusuales porque la varianza de y a menudo dependen del valor medio de y . Las variables que representan recuentos por unidad de área, volumen, tiempo, etc. Son ejemplos de esto.

“Puesto que \hat{y} es un estimador de $E(y)$, una gráfica de los residuales contra \hat{y} podría indicar como varia el intervalo de los residuales (y por tanto el de σ_y) conforme $E(y)$ aumenta. Si la gráfica exhibe el patrón que se muestra en la figura N° 2(a), se puede estabilizar la varianza de la respuesta ajustando \sqrt{y} (en lugar de y) a las variables independientes. Una grafica como la que se aprecia en la figura N° 2(b) se podría estabilizar la varianza de este tipo de datos con $y^* = \text{sen}^{-1} \sqrt{y}$, donde y se expresa en radianes.

Una tercera situación que requiere una transformación estabilizadora de la varianza se representa cuando la variable de respuesta y sigue un modelo multiplicativo. A diferencia de los modelos aditivos, en este modelo la variable dependiente se escribe como el producto de su media y el componente de error aleatorio:

$$y = [E(y)]\epsilon$$

La varianza de esta respuesta aumentará en proporción al cuadrado de la media, es decir, $\text{Var}(y) = [E(y)]^2 \sigma^2$, donde σ^2 es la varianza de ϵ . Los datos sujetos a errores multiplicativos producen un patrón de residuales alrededor de \hat{y} como el que se muestra en la figura N° 2(c). La transformación apropiada para este tipo de datos es $y^* = \log(y)$ ².

² William Mendenhall - Terry Sincich; Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencia; Pag. 651.

3.2.5.3 COMO DETECTAR LA FALTA DE NORMALIDAD

De los cuatro supuestos de la regresión estándar relativos al error aleatorio ε , el supuesto de que ε tiene una distribución normal es el menos restrictivo cuando aplicamos el análisis de regresión en la práctica. Es decir, desviaciones moderadas respecto al supuesto de normalidad afectan muy poco la validez de las pruebas estadísticas, intervalos de confianza e intervalos de predicción. En este caso, decimos que la regresión es robusta con respecto a la falta de normalidad. Sin embargo, las desviaciones considerables de la normalidad ponen en entredicho cualesquier inferencias que se deriven del análisis de regresión.

En el caso de muestras de moderadas a grandes, la forma más sencilla de determinar si los datos violan descaradamente el supuesto de normalidad es construir un histograma de frecuencia relativa. Si esta distribución tiene forma de joroba y no está muy sesgada, podremos estar razonablemente seguros de que las inferencias derivadas del análisis de regresión son válidas. En el caso de muestras pequeñas, los diagramas de cuadro a menudo proporcionan más información sobre la presencia o ausencia de sesgo en los datos.

3.2.5.4 COMO DETECTAR DATOS FUERA DE INTERVALO Y OBSERVACIONES CON INFLUENCIA.

Las gráficas de residuales también pueden servir para detectar valores fuera de intervalo, es decir, valores de y que al parecer no concuerdan con el modelo. Dado que casi todos los valores de y deben estar a una distancia de 3σ o menos de $E(y)$, los valores medios de y , esperaríamos que en su mayoría estuvieran a una distancia de $3s$ o menos de \hat{y} . Si un residual es mayor de $3s$ (en valor absoluto), lo consideramos como dato fuera de intervalo y buscaremos información de fondo que pueda explicar la razón de su valor tan grande.

Para detectar datos fuera de intervalo, podemos construir líneas horizontales situadas a una distancia de $3s$ arriba y debajo de cero (véase la figura N^o 3) en una gráfica de residuales. Cualquier residual que quede fuera de la banda formada por estas líneas se considerará un dato fuera de intervalo. Entonces, iniciaremos una investigación en busca de la causa de la desviación de tales observaciones respecto del comportamiento esperado.

3.2.5.5 DETECCIÓN DE ERRORES CORRELACIONADOS.

El supuesto de que los errores aleatorios son independientes (no correlacionados) se viola con mayor frecuencia cuando los datos empleados en un análisis de regresión son una serie de tiempo (no es nuestro caso).

Las medidas que pueden tomarse para remediar este problema implican proponer modelos de serie de tiempo complejos que incluyan un modelo tanto para el componente determinístico como para el error aleatorio.

TABLA N° 3.1: Notación para la regresión múltiple

Punto de Datos	Valor de y	X₁	X₂	...	X_k	Error aleatorio no observable
1	y₁	x₁₁	x₁₂	...	x_{1k}	ε₁
2	y₂	x₂₁	x₂₂	...	x_{2k}	ε₂
.
.
.
n	y_n	x_{n1}	x_{n2}	...	x_{nk}	ε_n

CAPITULO IV: APLICACIÓN

4.1 ANÁLISIS Y COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE LAS CORRELACIONES

Para realizar el trabajo de correlacionar el CBR con las demás variables independientes, utilizamos como herramienta de apoyo el software Minitab Release 13, el cual nos presenta el siguiente formado de salidas:

Regression Analysis: LN(CBR95%) versus IG

The regression equation is

$$\text{LN(CBR95\%)} = 3,22 - 0,157 \text{ IG} \dots\dots\dots \text{ecuación resultante del análisis}$$

Predictor	Coef	SE Coef	T (i)	P (ii)
Constant	3,22460	0,06766	47,66	0,000
IG	-0,157218	0,007609	-20,66	0,000

S = 0,6456 (s) R-Sq = 75,7% (R²) R-Sq(adj) = 75,5% (R²_a)

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F (*)	P (**)
Regression	1	177,97	177,97	426,94	0,000
Residual Error	137	57,11	0,42		
Total	138	235,08			

Observaciones:

- Las descripciones de los datos de salidas considerados en el análisis las indicamos con texto de color verde.
 - Los listados del Minitab se muestran en el anexo III, además mostramos en el mismo anexo las gráficas del análisis de residuales.
 - **(i) valor del estadístico "t"** (valor de α) en la prueba de t-student.
 - **(ii) nivel de significancia observado.** En nuestro caso nos indica que rechazaremos H_0 a favor de H_a con cualquier α mayor que 0,000.
- (*) valor de F** en la prueba F (Fisher).
- (**) nivel de significancia observado** (valor de α) de la prueba F. En este caso nos indica que rechazaríamos H_0 a favor de H_a para cualquier α mayor que 0,000.

Luego de culminar con el análisis hemos encontrado que las ecuaciones de los ítems 4.1.1 y 4.1.2 son las que mejor cumplen con los criterios estadísticos antes mencionados.

4.1.1 CBR EN FUNCIÓN DE UNA VARIABLE

$$CBR = 25.1435e^{-0.1572/G} \quad (4.1)$$

S	R ²	R ² _a	$r = \sqrt{R^2}$	Prueba t= P(t>t _α)=α	Prueba F= P(F>F _α)=α
0,6456	0.757	0.755	0.87	0.000	0.000

OBSERVACION: "s" es la desviación estándar estimada.

$$CBR = 65.4299e^{-0.03899N200} \quad (4.2)$$

S	R ²	R ² _a	$r = \sqrt{R^2}$	Prueba t= P(t>t _α)=α	Prueba F= P(F>F _α)=α
0,2599	0.962	0.962	0.98	0.000	0.000

OBSERVACION: "s" es la desviación estándar estimada.

$$CBR = 0.00186MDS^{13.018} \quad (4.3)$$

S	R ²	R ² _a	$r = \sqrt{R^2}$	Prueba t= P(t>t _α)=α	Prueba F= P(F>F _α)=α
0,2276	0.836	0.835	0.91	0.000	0.000

OBSERVACION: "s" es la desviación estándar estimada.

$$CBR = 18780.19OCH^{-3.1628} \quad (4.4)$$

S	R ²	R ² _a	$r = \sqrt{R^2}$	Prueba t= P(t>t _α)=α	Prueba F= P(F>F _α)=α
0,2483	0.80	0.799	0.894	0.000	0.000

OBSERVACION: "s" es la desviación estándar estimada.

4.1.2 CBR EN FUNCION DE VARIAS VARIABLES

$$CBR = \frac{49020.801}{OCH^{0.4505} LL^{1.0456} N200^{1.11475}} \quad (4.5)$$

S	R ²	R ² _a	$r = \sqrt{R^2}$	Prueba t= P(t>t _α)=α	Prueba F= P(F>F _α)=α
0,3065	0.941	0.939	0.97	0.000	0.000

OBSERVACION: "s" es la desviación estándar estimada.

ecuaciones. Las ecuaciones (4.3), (4.4) y (4.7) serán excluidas en la aplicación por tener una coeficiente de determinación bajo, esto nos indica que los valores obtenidos por estas ecuaciones tendrán un intervalo de predicción muy alto (mayor error).

4.2 DISEÑO DE AFIRMADO

Realizaremos la aplicación de las formulas desarrolladas en el diseño de pavimentos flexibles para carretera a nivel de afirmado. Para lo cual nos basaremos en el manual técnico TM 5 – 822 - 12 "DESING OF AGGREGATE SURFACED ROADS AND AIRFEILDS". Este manual presenta los procedimientos para el diseño de afirmados de agregado en caminos y campos de aviación. Para la aplicación del diseño nosotros solo utilizaremos la parte correspondientes a diseño de afirmados de carreteras.

4.2.1. ALCANCE

Este manual presenta el criterio para determinar el espesor, material, y requisitos de compactación para todas las clases de afirmados de agregado en caminos de Clase I, II, y III y para las instalaciones campos de aviación del Ejército americanas. El uso de los términos caminos incluye los caminos, calles, las áreas del almacenamiento abierto, y áreas de estacionamiento. Se presentan los requisitos de Diseño para zonas con o sin presencia de heladas.

4.2.2. DISEÑO DE AFIRMADOS DE AGREGADOS EN LOS CAMINOS

- a. **Procedimientos.** El diseño de afirmados de agregados de los caminos es similar al diseño de pavimentos flexibles de caminos como contenido en TM 5-822-5(visite la página web:www.usace.army.mil/publications).Este procedimiento involucra asignar una clase al camino a diseñar basado en el número de vehículos por día. Una categoría del diseño se asigna entonces al tráfico que determina un índice para el diseño. Este índice de diseño se usa en la **figura N° 4.1** para seleccionar el espesor (el mínimo de 4 pulgadas) de agregado requerido sobre un suelo con una resistencia dada expresada por el California Bearing Ratio (CBR), para las zona sin heladas, o por lo que se refiere a una zona de escarcha el índice de apoyo de suelos (FASSI).

- b. **Las clases de caminos.** Las clases de carpeta de agregado de los caminos varían de A - G. La Selección de la clase apropiada depende de la intensidad de tráfico y es determinado en la **tabla N° 4.2**
- c. **El índice de Diseño.** El Diseño de caminos enripiados esta basada en un índice de diseño que es un índice que representa todo el tráfico a usar el camino durante su vida probable. El índice de diseño esta basado en las magnitudes típicas y composiciones de tráfico reducidas a los equivalentes por lo que se refiere a las repeticiones de 18,000-libras de un eje-simple, carga de doble-llanta. Para diseños que involucran los vehículos de llantas de caucho, el tráfico es clasificado en tres grupos como sigue:
- **Grupo I:** Automóviles de pasajeros y camionetas (vehículos livianos).
 - **Grupo II:** Los camiones de dos-eje.
 - **Grupo III:** Camiones de Tres, cuatro, y cinco-eje.

La composición de tráfico se agrupará entonces en las categorías siguientes:

- **La categoría I.** El tráfico compuesto principalmente de los automóviles del pasajero, camionetas pickup (vehículos del Grupo 1), y no conteniendo más de 1 por ciento de camiones de dos eje (vehículos del Grupo 2).
- **La categoría II.** El tráfico compuesto principalmente de automóviles de pasajero, camionetas pickup (vehículos del Grupo 1), y conteniendo tanto como 10 por ciento camiones de dos eje (vehículos del Grupo 2). Ningún camión que tiene tres o más ejes (vehículos del Grupo 3) se permite en esta categoría.
- **La categoría III.** Tráfico que contiene tanto como 15 por ciento los camiones, pero con no más de 1 por ciento del tráfico total compuesto de camiones que tienen tres o más ejes (vehículos del Grupo 3).
- **La categoría IV.** Tráfico que contiene tanto como 25 por ciento los camiones, pero con no más de 10 por ciento del tráfico total compuestos de camiones que tienen tres o más ejes (vehículos del Grupo 3).
- **Categoría IVA.** Tráfico que contiene más de 25 por ciento camiones o más de 10 por ciento camiones que tienen tres o más ejes (vehículos del Grupo 3).

- d. **Vehículos Rastreados y camiones de remolque.** Vehículos rastreados que tienen pesos brutos que no exceden 15,000 libras y camiones con remolque teniendo pesos brutos que no exceden 6,000 libras pueden tratarse como camiones de dos-eje (el Grupo 2 vehículos) determinando el índice de diseño. Vehículos rastreados que tienen los pesos brutos excediendo las 15,000 libras pero no 40,000 libras y el camión remolque teniendo pesos brutos 6,000 libras pero que no exceden 10,000 libras pueden tratarse como Vehículos del Grupo 3 determinando el índice de diseño. El tráfico compuesto de vehículos rastreados que exceden las 40,000-libra el peso bruto y la carreta excediendo las 10,000-libra el peso bruto ha sido dividido en lo siguiente tres categorías(esté es nuestro caso):
- e. **El índice de Diseño.** El índice de diseño a ser usado en el diseño de un camino afirmado para los vehículos de llantas neumáticas usuales se seleccionará de la **tabla N° 4.3.**
- f. **Los caminos para los vehículos rastreados.** Caminos que sostienen tráfico de vehículos rastreados que pesan menos de 40,000 libras, y la carreta pesa menos de 10,000 libras, se diseñará de acuerdo con la clase pertinente y categoría de la tabla 4.3. Caminos que sostienen tráfico de vehículos rastreados, más pesado que 40,000 libras, y carretas más pesadas que 10,000 libras, se diseñará de acuerdo con la intensidad de tráfico y categoría de **Tabla N° 4.4.**
- g. **Vida del Diseño.** La vida asumida para el diseño es 25 años. Para una vida del diseño menor de 5 años, el diseño pone un índice en las tablas N° 4.3 y 4.4 que pueden ser reducidos en uno. No deben reducirse índices del diseño debajo de tres.
- h. **El criterio de espesores (zonas sin heladas).** Los requerimientos de espesores para carpeta de agregados en los caminos son determinados por **figura N° 4.1** para una resistencia de suelo dada e índice del diseño. El espesor mínimo requerido será 4 pulgadas. A la Figura N° 4.1 se entrará con el CBR de la subrasante para determinar el espesor de agregado requerido por el índice de

diseño apropiado. El espesor determinado de la figura puede construirse de relleno granular compactada para el espesor total encima de la subrasante natural o en un sistema de capas de relleno granular (incluso la subbases) y compactado la subrasante para el mismo espesor total. La sección de capas debe verificarse para asegurar que un espesor adecuado de material se usa para proteger la capa subyacente basada en el CBR de la capa subyacente. El relleno granular puede consistir en material proveniente de la base y subbase con tal de ser superior a las 6 pulgadas y reuniendo los requisitos de la gradación del párrafo 4.2.5.

4.2.3. CBR DE DISEÑO PARA LOS MATERIALES SELECTOS Y SUBBASES

El valor del CBR de diseño y los requisitos de materiales para los materiales selectos y subbases serán seleccionados de acuerdo con TM 5-822-2 excepto como se modifica en la tabla N° 4.5.

4.2.4. LAS CONSIDERACIONES EN ZONAS DE HELADAS

En zonas dónde hielan los efectos tiene un impacto en el diseño de pavimentos, consideraciones adicionales acerca de los espesores y requerimiento de las capas en la estructura del pavimento debe dirigirse. Se discuten las zonas específicas dónde la helada tiene un impacto en el diseño en los párrafos siguientes; sin embargo, una discusión más detallada de efectos de helada se presenta en TM 5-818-2. Para los propósitos de diseños de escarcha, los suelos han sido divididos en ocho grupos como se muestra en la **tabla N° 4.6**. Sólo el grupo nonfrostsusceptible (NFS) es conveniente para el capa base. Pueden usarse NFS, S1, o suelos de S2 para la capa de la subbase, y cualquiera de los ocho grupos puede encontrarse como los suelos de subrasante. Se listan los suelos en el orden aproximado de capacidad soporte decreciente durante los periodos de deshielo.

- a. **Requerimiento de espesor.** Donde hiela se encuentra susceptible la subrasante, el espesor de la sección requerido se determinará según el método de resistencia de subrasante reducido. El método de resistencia de subrasante reducido en zonas de escarcha requiere el uso de lista de índices de apoyo de suelos en **tabla N° 4.7**. En Zonas de heladas estos índices de apoyo de suelos se usan como si ellos fueran los valores de CBR; el término de CBR no se aplica

a ellos, porque, los valores medios por un ciclo anual no pueden determinarse por las pruebas de CBR. Se entran en la figura N° 4.1 con los índices de apoyo de suelos en lugar de los valores de CBR para determinar el espesor de la sección requerida.

- b. **Capas requeridas en la sección del pavimento.** Cuando la escarcha es una consideración, se recomienda que la sección del pavimento consista en una serie de capas que asegurarán la estabilidad del sistema, particularmente durante periodos de deshielos. El sistema de capas en el relleno de agregado puede consistir en una superficie de finos con piedra chancada, una capa base grava-graduado, y/o un subbase bien-graduado de arena o arena gravosa. Para asegurar la estabilidad de la superficie de rodadura, el ancho de la capa base y subbase debe exceder el ancho final de la superficie deseada por un mínimo de 1 pie en cada lado.
- c. **Capa de rodadura.** La capa de rodadura contiene una proporción de finos para la estabilidad en la carpeta de agregado. La presencia de finos ayuda las características de compactación de las capas y ayuda para proporcionar una superficie de paseo relativamente lisa.
- d. **Capa base.** La grava-graduada en la capa base es importante proporcionando drenaje de relleno granular. También es importante que este material sea nonfrostsusceptible (no susceptible a la escarcha) para que retenga su resistencia durante primavera en los periodos de deshielo.
- e. **Subbase.** La subbase de arena bien-graduado se usa para adicionar la capacidad de soporte encima de la subrasante susceptible a la escarcha (frostsusceptible) y como una capa de filtro entre la capa base grava-graduada y el subrasante para prevenir la migración del material mas grueso de la subrasante en los huecos durante los periodos de carga reducida de la subrasante. El material debe cumplir el criterio del filtro normal por consiguiente. Las sub base de arena deben ser nonfrost-susceptibles o de susceptibilidad a la helada baja (S1 o S2). La capa del filtro puede o no ser los necesarios dependiendo en el tipo de material de la subrasante. Si la subrasante consiste principalmente en arena o grava, la capa del filtro no puede ser necesaria y puede reemplazarse por una capa de base adicional si la gradación de la capa base es tal que reúne el criterio del filtro. Sin embargo, para los suelos de granos

más finos, la capa del filtro será necesaria. Si un geotextil se usa, la capa de sub base/filter de arena puede omitirse como el tejido se pondrá directamente en el subrasante y actuará como un filtro.

- f. **Compactación.** Las sub rasantes deben compactarse para mantener uniformidad de condiciones y una plataforma activa firme para la colocación y compactación de sub base. La compactación de subrasante no cambiará su índice de apoyo de suelo por zona de helada, sin embargo, porque la acción de la helada causará el subrasante para revertir a un estado más débil. En las zonas de heladas, los subrasante compactada no serán considerados parte del sistema de capas del camino que deben comprenderse de sólo llevar, base, y capas de sub base.
- g. **El espesor de capa base y capa de filtro.** Los espesores relativos de la capa base y capa del filtro son variables, y debe ser basado en la cubierta requerida y las consideraciones económicas.
- h. **Diseño alternativo.** El procedimiento de diseño resistencia de la subrasante reducido proporciona el espesor de suelo requerido sobre un subrasante susceptible a la helada para minimizar el esfuerzo por levantamiento de escarcha. Proporcionar un diseño más barato, un material frostsusceptible material selecto o sub base que pueden usarse como una parte del espesor total sobre la subrasante del frostsusceptible. Sin embargo, el espesor sobre el material selecto o los sub base deben ser determinados usando el FASSI del material selecto de la sub base. Donde se usan los suelos susceptibles a la escarcha como materiales selectos o sub bases, ellos deben reunir los requisitos de especificaciones actuales sólo que la restricción en el porcentaje aceptable más fino que 0.02 mm no se aplica.

4.2.5. LOS REQUISITOS DE CAPA DE AFIRMADO

Los requisitos para varios materiales a ser usado en la construcción de afirmado de agregado de los caminos son dependientes si o no a la helada, es una consideración en el diseño.

- a. **Zonas Nonfrost.** El material usado para la carpeta de afirmado de caminos deben ser suficientemente cohesivos resistir la acción abrasiva. Debe tener un límite líquido no mayor que 35 y un índice de plasticidad de 4 a 9. También debe

graduarse (el material) para la densidad máxima y volumen mínimo de vacíos para reforzar la retención de humedad óptima resistiéndose la intrusión de agua excesiva. Por consiguiente, la gradación debe consistir en la combinación óptima de agregados gruesos y finos que asegurarán al mínimo la proporción de vacíos y máxima densidad. Tal material exhibirá entonces resistencia cohesiva así como la resistencia intergranular al esfuerzo cortante. Las gradaciones recomendadas son mostradas en la tabla N° 4.8. Si la fracción fina del material no encuentra las características de plasticidad, la modificación por la suma de químicos podría requerirse. Los productos del cloruro pueden, en algunos casos, aumentar la retención de humedad, y la cal puede usarse para reducir la plasticidad excesiva.

- b. **Zonas de Heladas.** Como previamente se dijo, dónde la helada es una consideración en el diseño de caminos, un sistema de capas debe usarse. El porcentaje de finos debe restringirse en todas las capas para facilitar el drenaje y reducir la pérdida de estabilidad y resistencia durante los períodos de deshielo. Debe usarse la gradación número 3 y 4 mostrados en tabla N° 4.8 con la cautela ya que ellos pueden ser inestables en un helar-deshelar del ambiente.

4.2.6. LOS REQUISITOS DE COMPACTACIÓN

Los requisitos de compactación se expresan para las subrasantes y las capas granulares como un porcentaje de máxima densidad. Para las capas granulares, el material se compacta a 100 por ciento de la máxima densidad. Los materiales selectos y subrasantes en los rellenos tendrán las densidades igual o mayor que los valores mostrados en las **tabla N° 4.9 y 4.10**, para los caminos los rellenos se compactaran en ningún caso menos del 95 por ciento para suelos sin cohesión ($IP < 5$; $LL < 25$) o 90 por ciento de compactación para los suelos cohesivos ($IP > 5$; $LL > 25$). Subrasante en los cortes tendrá las densidades igual o mayor que los valores mostrados en tabla N° 4.9. Subrasantes provenientes en las secciones cortadas o se compacta la superficie para reunir las densidades mostradas en tabla N° 4.9, remover y reemplazar antes de aplicar los requisitos para rellenos, o cubrir con el material suficiente para que la subrasante no compactado estuvieran en un espesor dónde las densidades del lugar(colocar, instalar) son satisfactorias. Los espesores

(profundidades) mostradas en tabla N° 4.9 son medidos de la superficie de agregado del camino y no la superficie de la subrasante.

4.2.7. LOS REQUISITOS DE DRENAJE.

El adecuado drenaje de la superficie debe mantenerse para minimizar el daño de humedad. La extracción expeditiva de agua de la superficie reduce el potencial para la absorción y asegura resistencia más consistente y el mantenimiento reducido. El drenaje, sin embargo, debe proporcionarse de una manera para evitar el daño a la superficie de agregado de camino a través de la erosión de finos o erosión total de la capa superficial. También, el cuidado debe tenerse para asegurar que el cambio en el régimen de drenaje global como resultado de la construcción puede acomodarse a la topografía circundante sin el daño al ambiente o al camino recientemente construido o campo de aviación.

- a. La geometría de la superficie de un camino debe diseñarse para que el drenaje se proporcione a todos los puntos. Dependiendo del terreno circundante, el drenaje de la superficie de la carretera puede lograrse por una pendiente cruzada incesante o por una serie de dos pendientes cruzadas interconectadas (bombeo). El criterio exigirá colocar las pendientes cruzadas de una manera de quitar el agua del camino a los posibles puntos más cercanos mientras se aprovecha de la geometría de la superficie natural a la mayor magnitud posible.
- b. El drenaje adecuado debe proporcionarse fuera del camino para acomodar el posible flujo máximo del drenaje del camino. Se mantendrán regueras y alcantarillas para este propósito. Deben usarse las alcantarillas económicamente y sólo en las áreas donde la tapa adecuada de relleno granular se proporciona encima de la alcantarilla. Adicionalmente, deben evaluarse áreas adyacentes y sus provisiones del drenaje para determinar si el redireccionamiento se necesita prevenir el agua de otras áreas que fluyen por el camino.
- c. El drenaje es un factor crítico en el diseño de carpeta de agregados de caminos, construcción, y mantenimiento. Por consiguiente, el drenaje debe ser considerado anterior a la construcción, y cuando es necesario, sirva como una base para la selección del sitio.

4.2.8. LOS REQUISITOS DE MANTENIMIENTO

Las dos causas principales de deterioro de la carpeta de agregado de caminos que requieren el mantenimiento frecuente son el ambiente y tráfico. Lluvia o flujo de agua lavarán los finos de la carpeta de agregado y reduce la cohesión, mientras la acción de tráfico causa desplazamiento de materiales de la superficie. El mantenimiento debe realizarse cada 6 meses por lo menos y más frecuentemente si se requiere. La frecuencia de mantenimiento será alta durante los primeros años de uso pero disminuirá con el tiempo a un valor constante. La mayoría del mantenimiento consistirá en nivelación periódico quitar los baches y hoyos que se crearán inevitablemente por el ambiente y tráfico y reemplazar los finos. De vez en cuando durante la vida del camino, la capa de la superficie puede tener que ser escarificado, agregar grava adicional para aumentar el espesor que originalmente requirió, y el recompactar la superficie desgastada a la densidad especificada.

4.2.9 CÁLCULO DE ESPESORES DEL PAVIMENTO

Antes de iniciar con el desarrollo del diseño es necesario realizar un agradecimiento al equipo de ingenieros y técnicos que trabajaron en el estudio de la carretera Juanjui - Tocache pues estas personas a cargo del Ing. Alex Yturry Gárnica (Jefe del Proyecto) nos facilitaron y permitieron utilizar la información proveniente de este proyecto vial. La información consta en los registros (Registro N° 737) de la Oficina de Apoyo Tecnológico del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

Realizaremos el diseño de la carpeta de afirmado a manera de comprobación de nuestras fórmulas en el tramo I Juanjui - Campanilla de este proyecto vial en estudio, para poder comparar los espesores resultantes de afirmado calculados con valores de CBR obtenidos en laboratorio versus CBR obtenidos por las formulas matemáticas desarrolladas en el ítem 4.1.

Para realizar el cálculo de espesores de afirmado necesitaremos datos de estudio de tráfico que se muestran en la tabla N° 4.11, así como, las tasas de crecimiento anual y los factores destructivos de los vehículos, estos datos se muestran en las tablas N° 4.12 y 4.13 respectivamente.

Los valores de la capacidad de soporte del material de sub rasante, obtenidas en laboratorio y por medio de las formulas matemáticas, las mostramos en las tablas N° 4.15 y 4.16. Estos valores corresponden a los materiales encontrados a una

profundidad promedio de 0.60m, además por debajo de esta profundidad tienen material de por lo menos 0.30 m de espesor

Aplicaremos la siguiente ecuación para determinar el número de ejes equivalentes de 8.2 ton:

$$N = \frac{365}{2} \left[IMD_{OMNIBUS} \times FD_{BUS} + IMD_{C-2E} \times FD_{C-2E} + IMD_{C-3E} \times FD_{C-3E} + IMD_{TyST} \times FD_{TyST} \right] \left[\frac{1+r}{1+r} \right]^{-n} \quad (4.10)$$

Donde:

N = número de ejes de 8.2 ton.

r = Tasa de crecimiento anual.

n = Numero de años a la cual se proyecta (vida útil o vida probable).

Este valor nos permitirá obtener el valor de la resistencia de diseño (percentil) con la ayuda de la tabla N° 4.14.

Reemplazando en la ecuación (4.10) los datos de las tablas 4.11, 4.12 y 4.13; considerando una vida probable del afirmado de 10 años (en la formula colocaremos n=12 por demoras en construcción u/o licitación) se obtiene:

$$N = 87805$$

El criterio mas difundido para la determinación del valor de la resistencia de diseño es el propuesto por el Instituto del Asfalto, el cual recomienda tomar un valor total, que el 60, el 75 o el 87.5% de los valores individuales sea igual o mayor que él, de acuerdo con el tránsito que se espera circule sobre el pavimento, como se muestra en la tabla N° 4.14.

Nosotros obtuvimos $N = 87805$; $10^4 < N < 10^6$; de donde nuestro valor de resistencia será determinado por el percentil 75 de todos nuestros datos muestrales.

La clase de carretera la obtendremos de la tabla N° 4.2 con el IMD indicado en la tabla N° 4.11.

Clase de camino clase E

El tipo de tráfico de la vía será categorizado según lo descrito en el ítem 4.2.c-d y la tabla N° 4.1.

Categoría de tráfico VI

La categoría del tráfico determina un índice de diseño. Este índice de diseño se usa con la figura N° 4 para determinar el espesor de carpeta requerido. Se obtiene el índice de diseño de las tablas N° 4.3 y 4.4.

Índice de diseño 9

La zona de estudio no tiene presencia de heladas.

Tipo de zona Nonfrost.

Como el tipo de zona es Nonfrost, la resistencia de la sub rasante estará determinada por el CBR. Para determinar el CBR de diseño utilizaremos el criterio propuesto por el Instituto del Asfalto. Ya en renglones arriba determinamos que el valor de la resistencia de diseño estará determinado por el percentil 75 el cual se halla de las figuras N° 5 y N° 6 y se muestran en la tabla N° 4.17.

Los espesores del pavimento se obtienen mediante la figura N° 4, utilizando el índice de diseño y CBR de diseño. Los resultados se muestran en la tabla N° 4.18.

Los resultados muestran que no existe una variación sustancial en el cálculo de espesores y en la obtención del CBR de diseño, lo cual nos demuestra la utilidad de estas fórmulas y de la consistencia de las mismas.

"FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CBR A PARTIR DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS"

TABLA N° 4.1

MÁXIMO PESO TOTAL DE VEHÍCULO, en libras		
CATEGORIA	VEHÍCULOS RASTREADOS(remolque)	CARRETA (trailer)
V	60,000	15,000
VI	90,000	20,000
VII	120,000	35,000

TABLA N° 4.2 CRITERIO PARA LA SELECCIÓN DE LA CLASE DE CAMINOS DE CARPETA DE AGREGADOS

CLASE DE CARRETERA	NUMERO DE VEHICULOS POR DIA
A	10,000
B	8,400 – 10,000
C	6,300 – 8,400
D	2,100 – 6,300
E	210 – 2,100
F	70 – 210
G	MENOS DE 70

TABLA N° 4.3: INDICE DE DISEÑO PARA VEHÍCULOS CON LLANTA NEUMATICA

INDICE DE DISEÑO				
CLASE	CATEGORIA I	CATEGORIA II	CATEGORIA III	CATEGORIA IV
A	3	4	5	6
B	3	4	5	6
C	3	4	4	6
D	2	3	4	5
E	1	2	3	4
F	1	1	2	3
G	1	1	1	2

"FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CBR A PARTIR DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS"

TABLA N° 4.4: INDICE DE DISEÑO PARA CARRETAS Y VEHÍCULOS RASTREADOS

CATEGORIA DE TRÁFICO	NÚMERO DE VEHÍCULOS POR DÍA (O SEMANA COMO INDICA)							
	500	200	100	40	10	4	1	1 POR SEMANA
V	8	7	6	6	5	5	5	-
VI	-	9	8	8	7	6	6	5
VII	-	-	10	10	9	8	7	6

TABLA N° 4.5: LOS VALORES PERMISIBLES MÁXIMOS PARA LAS SUBBASES Y LOS MATERIALES SELECTOS.

MATERIAL	VALOR MAXIMO PERMISIBLE					
	MAXIMO CBR DE DISEÑO	REQUERIMIENTOS DE GRADACION				
		TAMAÑO EN PULGADAS	TAMIZ N° 10	TAMIZ N° 200	LIMITE LIQUIDO*	INDICE PLASTICO*
Sub base	50	2	50	15	25	5
Sub base	40	2	80	15	25	5
Sub base	30	2	100	15	25	5
Material Seleccionado	20	3	-	-	35	12

* Estos valores de determinan de acuerdo con ASTM D 4318.

SUELOS"

TABLA N° 4.6: CLASIFICACION DE SUELOS - DISEÑO ZONAS DE HELADAS.

GRUPO ESCARCHA	TIPO DE SUELOS	PORCENTAJE EN PESO MAS FINO QUE 0.02	CLASIFICACION TIPICA SUCS
NFS*	(a) GRAVA PIEDRA CHANCADA CRUSHED ROCK	0 - 1.5	GW, GP
PFS**	(b) ARENA	0 - 3	SW, SP
	(a) GRAVA PIEDRA CHANCADA CRUSHED ROCK	1,5 - 3	GW, GP
S1	(b) ARENA	3 - 10	SW, SP
	SUELO GRAVOSO	3 - 6	GW, GP, GW-GM, GP-GM
S2	SUELO ARENOSO	3 - 6	SW, SP, SW-SM, SP-SM
F1	SUELO GRAVOSO	6 a 10	GM, GW-GM, GP-GM
F2	(a) SUELO GRAVOSO	10 a 20	GM, GW-GM, GP-GM
	(b) ARENA	6 a 15	SM, SW-SM, SP-SM
F3	(a) SUELO GRAVOSO	mayor a 20	GM, GC
	(b) ARENA, EXCEPTO muy fino arena limosa	mayor a 15	SM, SC
F4	© ARCILLAS, IP>12		CL, CH
	(a) TODOS LOS LIMOS		ML, MH
	(b) ARENA MUY LIMOSA	mayor a 15	SM
	© ARCILLAS, IP<12		CL, CL-ML
	(d) ARCILLA ESTRATIFICADA y otros estratos sedimentarios de grano fino		CL and ML CL, ML, and SM CL, CH, and ML CL, CH, ML and SM

* Nonfrost-susceptible.

** Posiblemente susceptible a heladas, pero requiere ensayo del laboratorio para determinar la clasificación del suelo de diseño en zonas de helada.

TABLA N° 4.7: ÍNDICES DE APOYO EN ZONAS DE HELADAS PARA SUELOS DE SUBRASANTE

GRUPO DE HELADA SUELOS DE SUBRASANTE	ZONAS DE HELADA INDICE DE APOYO DE SUELOS
F1 y S1	9.0
F2 y S2	6.5
F3 y F4	3.5

"FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CBR A PARTIR DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS"

TABLA N° 4.8: GRADACIÓN DE AGREGADOS DE LA CARPETA DE AFIRMADO

DESIGNACION DE TAMIZ		N° 1	N° 2	N° 3	N° 4
25.00 mm	1 in	100	100	100	100
9.5 mm	3/8 in	50 - 85	60 - 100	-	-
4.7 mm	N° 4	35 - 65	50 - 85	55 - 100	70 - 100
2.00 mm	N° 10	25 - 50	40 - 70	40 - 100	55 - 100
0.425 mm	N° 40	15 - 30	24 - 45	20 - 50	30 - 70
0.075 mm	N° 200	8 - 15	8 - 15	8 - 15	8 - 15

NOTA: EL PORCENTAJE EN PESO MAS FINO QUE 0.02 mm NO EXCEDERA 3 POR CIENTO.

TABLA N°4.9: REQUISITOS DE COMPACTACIÓN PARA LOS CAMINOS, SUELOS COHESIVOS.

PORCENTAJE DE COMPACTACION	ESPESOR DE COMPACTACION (EN PULGADAS) PARA EL ÍNDICE DE DISEÑO INDICADO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100	2	3	3	3	4	4	4	5	5	6
95	4	5	5	6	7	7	8	9	10	11
90	6	7	8	9	10	11	12	13	15	17
85	7	9	10	12	13	15	16	18	20	22
80	9	11	13	14	16	18	20	22	25	27

TABLA N° 4.10: REQUISITOS DE COMPACTACIÓN PARA LOS CAMINOS, SUELOS NO COHESIVOS.

PORCENTAJE DE COMPACTACION	ESPESOR DE COMPACTACION (EN PULGADAS) PARA EL ÍNDICE DE DISEÑO INDICADO									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100	4	5	5	6	7	7	8	9	10	11
95	7	8	10	11	12	14	15	17	19	21
90	10	12	14	16	18	20	22	24	28	30
85	13	16	18	21	23	26	29	31	35	38

"FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CBR A PARTIR DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS"

**TABLA N° 4.11: ESTUDIO DE TRÁFICO SUB TRAMO I
ÍNDICE MEDIO DIARIO - ESTACIÓN E1 - JUANJUI**

TIPO DE TRAFICO	VEHICULOS LIGEROS			CAMIONETAS/OMNIBUS/TyS					IMD
	AUTOS	COMBIS	MICROS	BUS	C-2E	C-3E	2S2	2S3	
	GRUPO I			GRUPO II		GRUPO III			
NORMALx FCE	60	82	1	1	30	15	0	0	189
PORCENTAJE	31,75%	43,39%	0,53%	0,53%	15,87%	7,94%	0,00%	0,00%	100,00%
DERIVADO	65	17	0	4	11	8	22	17	144
GENERADO	5	4	0	1	2	2	2	1	17
TOTAL AL 2002	130	103	1	6	43	25	24	18	350
PORCENTAJE	37,14%	29,43%	0,29%	1,71%	12,29%	7,14%	6,86%	5,14%	100,00%
	66,86%			14,00%		19,14%			100,00%
	66,86%					33,14%			100,00%

FUENTE: CENSO VEHICULAR (2002)

ELABORADO: JEFATURA DE PROYECTO DEL ESTUDIO

TABLA N° 4.12: TASA DE CRECIMIENTO

AUTOS Y PICK-UP (VEHICULOS LIGEROS)	OMNIBUS	CAMIONES PESADOS
4,30%	3,20%	4,00%

TABLA N° 4.13: FACTORES DESTRUCTIVOS

FACTORES DESTRUCTIVOS				
VEHICULOS LIGEROS	OMNIBUS	C2EJES	C3EJES	T y ST
-	2,58	2,58	6,79	12,77

FUENTE: REFERENCIA 9.

TABLA N° 4.14: LÍMITES PARA LA SELECCIÓN DE RESISTENCIA

NÚMERO DE EJES DE 8.2 TN EN EL CARRIL DE DISEÑO (N)	PERCENTIL A SELECCIONAR PARA HALLAR LA RESISTENCIA
< 10 ⁴	60
10 ⁴ – 10 ⁶	75
> 10 ⁶	87.5

FUENTE: PAG. 68 REFERENCIA N° 10.

"FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CBR A PARTIR DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS"

TABLA Nº 4.15: RESUMEN DE ENSAYOS DE CBR EN LABORATORIO

Nº	PROGRESIVA		MUEST.	PROFUN. (m)	CBR (100%)	CBR (95%)	CLASIFICACIÓN	
							SUCS	AASHTO
1	00+300	DER	M-3	0.55-1.50	3,7	2,2	CL	A-6(15)
2	01+820	IZQ	M-2	0.15-1.50	4,6	4	CL	A-6(10)
3	05+500	EJE	M-1	0.0-0.90	11,5	6,4	SM	A-2-4(0)
4	8+500	EJE	M-1	0.00-1.50	7	5,5	CL	A-4(6)
5	10+500	IZQ	M-2	0.05-1.50	4,2	2,6	CL	A-6(14)
6	12+250	DER	M-1	0.00-1.50	5,1	3,4	CL	A-4(7)
7	14+000	IZQ	M-2	0.15-1.50	2,8	2	CH	A-7-6(36)
8	16+000	IZQ	M-1	0.00-1.50	4	1,8	CL	A-7-6(18)
9	18+750	DER	M-3	0.35-1.50	3,4	2,1	CL	A-6(15)
10	21+000	IZQ	M-1	0.00-1.50	3,1	2	CH	A-7-6(36)
11	23+000	EJE	M-1	0.00-1.50	2,7	1,4	CL	A-7-6(23)
12	25+500	IZQ	M-2	0.15-1.50	3,3	1,6	CL	A-6(13)
13	29+750	EJE	M-2	0.10-1.50	3	1,9	CL	A-6(13)
14	31+750	IZQ	M-2	0.35-1.50	3,7	1,6	CL	A-6(17)
15	33+750	DER	M-1	0.00-1.50	3,3	1,8	CL	A-6(17)
16	36+500	IZQ	M-2	0.10-1.50	4,1	2,6	CL	A-6(14)
17	39+500	DER	M-2	0.10-1.50	3,8	2,5	CL	A-6(14)
18	42+250	DER	M-2	0.20-1.50	3,4	2,1	CL	A-6(16)

FUENTE: REGISTRO Nº 737 MTC- OAT - TRAMO I JUNAJUI CAMPANILLA

SUELOS"

TABLA N° 4.16: VALORES DE CBR INFERIDAS

ITEM	PROGRESIVA	PROF.	CBR(95%)	CBR(95%)	CLASIFICACIÓN
			ECUAC (4.2)	ECUAC (4.6)	
1	0+100	0.60-1.50	5,610	2,746	CL
2	0+300	0.55-1.50	2,201	2,787	CL
3	0+500	0.40-1.50	5,833	4,414	CL
4	0+750	0.30-1.50	3,250	3,937	CL
5	1+200	0.20-1.50	4,270	3,003	CL
6	1+400	0.45-1.50	2,288	3,291	CL
7	1+820	0.15-1.50	5,189	3,398	CL
8	2+000	0.40-1.50	1,958	1,715	CL
9	2+200	0.15-1.00	2,781	3,696	CL
10	2+600	0.05-1.50	2,474	1,917	CL
11	2+800	0.10-1.50	5,189	3,398	CL
12	3+000	0.00-1.50	2,201	2,435	CL
13	3+250	0.05-1.50	2,892	2,541	CL
14	3+500	0.00-1.50	2,572	2,503	ML
15	3+750	0.10-1.50	13,755	8,932	SC
16	4+000	0.10-0.90	2,474	3,134	CL
17	4+250	0.00-1.50	7,371	5,204	CL
18	4+500	0.45-1.00	29,999	20,396	GC
19	4+750	0.20-1.50	2,288	3,043	CL
20	5+250	0.15-1.25	3,799	3,351	CL
21	5+500	0.00-0.90	10,469	8,740	SM
22	5+750	0.40-1.50	20,313	16,954	SM
23	6+250	0.30-0.70	10,069	8,118	SM
24	6+500	0.00-1.50	2,675	2,080	CL
25	6+750	0.00-1.50	3,799	3,599	CL
26	7+000	0.00-1.50	1,550	2,153	CL
27	7+500	0.15-1.50	2,036	2,527	CL
28	7+750	0.05-1.50	2,036	2,224	CL
29	8+250	0.00-1.50	8,286	4,253	CL
30	8+500	0.00-1.50	1,675	3,503	CL
31	8+750	0.00-1.50	1,550	2,868	CL
32	9+000	0.30-1.50	1,958	2,334	CL
33	9+250	0.20-1.50	7,371	3,104	CL
34	9+500	0.07-1.50	2,117	2,652	ML
35	9+750	0.25-1.50	2,379	2,356	CL
36	10+000	0.05-1.50	2,572	2,049	CL
37	10+250	0.20-0.75	7,371	3,182	CL
38	10+500	0.05-1.50	2,474	2,465	CL
39	10+750	0.15-1.50	2,379	2,507	CL
40	11+000	0.20-1.00	12,723	8,064	SC
41	11+250	0.20-1.00	55,981	-	GP
42	11+750	0.60-1.50	2,379	2,589	CL
43	12+250	0.00-1.50	2,288	3,915	CL
44	12+500	0.10-1.50	2,201	2,360	CL
45	12+750	0.00-1.50	2,572	2,503	CL
46	13+000	0.00-1.50	2,117	2,401	CL
47	13+250	0.00-1.50	2,117	2,326	CL
48	13+750	0.50-1.50	1,550	2,868	CL
49	14+000	0.15-1.50	1,611	1,306	CH
50	14+250	0.00-1.10	42,610	44,885	GP-GC
51	14+500	0.00-1.50	2,036	4,859	ML
52	14+750	0.00-1.50	1,958	3,109	CL
53	15+000	0.08-1.50	4,991	6,325	ML
54	15+250	0.15-0.90	2,781	3,160	CL
55	15+500	0.00-2.00	1,611	2,050	CL

SUELOS"

56	15+750	0.00-1.50	1,958	2,988	CL
57	16+000	0.00-1.50	1,742	2,043	CL
58	16+250	0.10-1.50	1,883	2,163	CL
59	16+500	0.00-1.50	3,006	2,662	ML
60	16+750	0.55-1.50	1,883	2,231	CL
61	17+750	0.00-1.50	4,617	3,114	CL
62	18+500	0.00-2.00	2,474	2,811	CL
63	18+750	0.35-1.50	2,892	2,621	CL
64	19+250	0.30-1.50	3,126	3,312	CL
65	19+500	0.20-1.50	2,201	2,691	CL
66	19+750	0.05-1.50	2,201	2,890	CL
67	20+000	0.00-1.50	2,117	2,401	CL
68	20+250	0.10-1.50	32,432	17,468	GC
69	20+750	0.10-1.50	1,742	1,341	CH
70	21+000	0.00-1.50	1,811	1,360	CH
71	21+250	0.05-1.50	10,069	5,660	SC
72	21+500	0.20-1.50	2,201	2,435	CL
73	21+750	0.15-1.50	1,958	2,193	CL
74	22+000	0.15-1.50	2,036	2,293	CL
75	22+260	0.10-1.50	2,117	2,563	CL
76	22+500	0.25-1.50	1,958	2,262	CL
77	22+750	0.00-1.50	2,675	2,897	CL
78	23+000	0.00-1.50	2,117	1,808	CL
79	23+250	0.60-1.50	2,117	2,256	CL
80	23+500	0.10-1.50	2,201	2,360	CL
81	23+750	0.10-1.50	2,201	2,890	CL
82	24+000	0.10-1.50	2,036	3,285	CL
83	24+250	0.00-1.50	1,958	3,109	CL
84	24+500	0.15-1.50	2,036	2,615	CL
85	24+743.34	0.15-1.50	1,958	2,334	CL
86	24+750	0.45-1.50	2,117	2,849	CL
87	25+000	0.20-1.50	1,958	2,262	CL
88	25+250	0.00-1.50	2,036	2,527	CL
89	25+500	0.15-1.50	2,117	2,401	CL
90	25+750	0.25-1.50	1,675	2,442	CL
91	26+000	0.00-1.50	2,117	2,652	CL
92	26+500	0.25-1.50	2,781	2,843	CL
93	27+000	0.00-1.50	2,036	2,527	ML
94	27+250	0.00-1.50	1,883	2,732	CL
95	28+250	0.00-0.90	1,883	2,302	CL
96	28+500	0.00-1.50	27,749	26,372	GM-GC
97	28+750	0.00-1.50	2,036	3,153	CL
98	29+250	0.00-1.50	26,688	17,844	GC
99	29+750	0.10-1.50	1,490	2,348	CL
100	30+000	0.40-1.50	1,958	2,334	CL
101	30+500	0.00-1.50	2,036	2,159	CL
102	30+750	0.35-1.50	27,749	20,572	GM-GC
103	31+000	0.00-1.50	3,950	3,531	CL
104	31+250	0.00-1.50	1,742	2,043	CL
105	31+500	0.00-1.50	2,036	2,293	CL
106	31+750	0.35-1.50	1,675	2,211	CL
107	32+250	0.30-1.50	1,811	2,200	CL
108	32+500	0.00-1.50	2,474	3,019	CL
109	33+000	0.15-1.10	2,474	2,391	CL
110	33+500	0.00-1.50	18,790	12,320	SM-SC
111	33+750	0.00-1.50	1,811	2,271	CL
112	34+000	0.00-1.50	2,201	2,515	CL
113	34+500	0.05-1.50	2,036	2,367	CL
114	34+750	0.00-1.50	2,288	2,638	CL

SUELOS"

115	35+000	0.15-1.50	2,474	2,717	CL
116	35+500	0.00-1.50	2,036	2,224	CL
117	36+000	0.20-1.50	16,715	14,756	SM
118	36+500	0.10-1.50	2,474	2,811	CL
119	36+750	0.00-1.50	3,514	3,131	CL
120	37+000	0.10-1.50	8,286	3,023	CH
121	37+250	0.25-1.50	4,617	4,414	CL
122	37+500	0.15-1.50	1,811	2,345	CL
123	37+750	0.25-1.50	8,615	2,960	CH
124	38+000	0.00-1.50	2,117	2,652	CL
125	38+750	0.35-1.50	26,688	24,946	SM
126	39+000	0.00-0.85	13,755	6,871	SC
127	39+250	0.00-1.50	37,906	55,445	GM
128	39+500	0.10-1.50	2,379	2,356	CL
129	39+750	0.15-1.50	1,883	2,302	CL
130	40+000	0.35-1.50	1,883	1,323	OH
131	40+250	0.15-1.50	10,069	9,419	SM
132	40+750	0.10-1.50	19,537	15,454	SM
133	41+000	0.15-1.50	4,991	5,716	ML-CL
134	41+250	0.15-1.50	3,006	2,662	ML
135	41+500	0.15-1.50	3,380	2,710	ML
136	41+750	0.15-1.50	4,617	3,793	CL
137	42+000	0.30-1.50	46,066	80,651	GP-GM
138	42+250	0.20-1.50	2,117	2,256	CL
139	42+500	0.25-1.50	1,611	1,457	MH
140	42+750	0.20-1.50	2,117	2,401	CL
141	43+000	0.15-1.50	1,811	1,552	MH
142	43+135	0.50-1.50	2,474	2,073	CL

TABLA N° 4.17: VALORES DE CBR DE DISEÑO

PERENTIL	CBR DE DISEÑO LABORATORIO	CBR DE DISEÑO ECUACION 4.2	CBR DE DISEÑO ECUACION 4.6
75	1,9%	2%	2,2%

TABLA N° 4.18: ESPESORES DE AFIRMADO EN PULGADAS

LABORATORIO	ECUACIÓN 4.2	ECUACIÓN 4.6
27 in	27in	25 in

CAPITULO V: EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se realizará un cuadro comparativo de los costos que nos implicaría poder realizar el estudio de la capacidad de soporte del material de sub rasante en laboratorio y mediante las ecuaciones obtenidas de las correlaciones.

Para poder conocer la capacidad de soporte del material de subrasante es necesario realizar el ensayo de CBR cuyos costos en laboratorio se indica en la tabla N° 5.1

Como forma alternativa de conocer la capacidad de soporte del material de subrasante planteamos unas ecuaciones matemáticas que nos implicarían realizar algunos ensayos en laboratorio cuya descripción y costo se indican en la tabla N° 5.2.

Si analizamos las ecuaciones del ítem 4.1 nos podremos percatar que no todos los ensayos descritos en la tabla N° 5.2 son necesarios para aplicar las ecuaciones y que los costos se podrían reducir considerablemente. La tabla N° 5.3 nos ayudará a apreciar mejor este comentario.

Como se apreciamos en la tabla N° 5.3 los costos se redujeron, en algunos casos, hasta un 78% en comparación al monto de un ensayo de laboratorio.

El costo por prospecciones a cielo abierto o calicatas son iguales para ambos casos es por eso que no se incluye en el cuadro comparativo.

Algo que también se podría mencionar es, el tiempo promedio empleado en realizar un ensayo de CBR en laboratorio es de 5 días, contra 1 día empleado para poder realizar cualquiera de los ensayos descritos en la tabla N° 5.2.

"FORMULACIÓN MATEMÁTICA PARA LA ESTIMACIÓN DEL CBR A PARTIR DE PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS SUELOS"

TABLA Nº 5.1: COSTOS DE CBR EN LABORATORIO

DESCRIPCION DEL ENSAYO	COSTO S/. (nuevos soles)
CBR	260

Fuente: Laboratorio Nº 2 - Mecánica de Suelos Universidad Nacional de Ingeniería.

TABLA Nº 5.2: COSTOS DE ENSAYOS EN LABORATORIO

DESCRIPCION DEL ENSAYO	COSTO S/. (nuevos soles)
ANALISIS GRANULOMETRICO POR TAMIZADO	55
LIMITE LIQUIDO	30
LIMITE PLASTICO	30
PROCTOR MODIFICADO	95
MONTO TOTAL	S/. 210

Fuente: Laboratorio Nº 2 - Mecánica de Suelos Universidad Nacional de Ingeniería.

TABLA Nº 5.3: CUADRO COMPARATIVO DE COSTOS

ECUACIÓN	DATOS A UTILIZAR	MONTO POR ENSAYO	COSTO S/. (nuevos soles)
II	<N200 (Análisis granulométrico)	55	55
V	OCH, LL, <N200 (próctor, limite liquido, análisis granulométrico).	95 30 55	180
VI	LL, <N200 (limite liquido, análisis granulométrico)	30 55	85
VIII	MDS, <N200 (próctor, análisis granulométrico)	95 55	150
OBSERVACIÓN: Solo colocamos las ecuaciones que mejor cumplen los criterios estadísticos y que se aplicaran en el diseño de afirmado.			

CAPITULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 RECOMENDACIONES

1. La predominación de material cohesivo y fino en los cuatro tramos de esta carretera en estudio es una consideración muy importante en este tema de investigación y para tomar en cuenta cuando se quiera aplicar las ecuaciones resultantes en otras zonas geográficas.
2. Esta investigación no pretende suplantar el ensayo de CBR, en la obtención de la capacidad de soporte del material de subrasante, pero si desea ser una herramienta de apoyo para aquellos lugares en donde no se cuenta con un laboratorio de mecánica de suelos y se realicen estudios de carreteras, como es el caso de muchas provincias en nuestro país.
3. La metodología empleada, en esta tesis de grado, para el diseño de pavimentos a nivel de afirmado se puede aplicar en los estudios de carreteras vecinales, apertura de nuevas carreteras, etc., en las cuales se considere o se quiera considerar un enripiado de la superficie de rodadura.
4. La obtención de ecuaciones matemáticas para estimar el CBR, en todas las regiones de nuestro país, nos permitiría llenar un vacío técnico en la elaboración de estudios de proyectos viales. Esto porque los gobiernos regionales no cuentan con presupuesto para un adecuado estudios de carreteras y en muchos casos (por no decir todos) el cálculo de espesores de afirmado se realiza por algún criterio del proyectista que no se especifica o que generalmente se toma como estándar de ripiado el espesor de 10 cm. sin tomar en cuenta la verdadera capacidad de soporte del terreno. Llenar este vacío técnico es uno de los objetivos de este tema de investigación.
5. En algunas metodologías de diseño de firmes se contempla como la propiedad definitiva de material para caracterizar al suelo de fundación al Modulo Resilente. Varias son las formulas para correlacionar el Modulo Resilente con valores del CBR como por ejemplo el propuesto por Heukelom y Klomp: $M_r = 1500 \times CBR$. Por lo tanto también se puede utilizar los valores de CBR inferidas para diseñar pavimentos utilizando otras metodologías y/o criterios.

6.2 CONCLUSIONES

1. Para la caracterización de los suelos del terreno de fundación de la carretera, la jefatura del proyecto ha ejecutado 692 prospecciones a "cielo abierto" (calicatas) de 1.5 m de profundidad, distanciadas entre 200 a 250 m uno del otro y distribuidos en forma alternada ("tres bolillos"), de modo que la información obtenida sea representativa de la zona de estudio.
2. Las ecuaciones 4.2, 4.5, 4.6 y 4.8 resultantes del análisis realizado en el ítem 4.1 son las que mejor se ajustaron a los modelos mostrados y las que se utilizarán para poder determinar la capacidad de soporte de suelos (CBR). Las ecuaciones 4.1, 4.3, 4.4, 4.7 y 4.9 se muestran para poder evaluarlos en investigaciones posteriores pues investigadores citadas en las referencias encontraron mejores resultados.
3. Los costos para determinar la capacidad de soporte de los suelos obtenidos por las formulas de correlación se reducen desde un 31% a un 79%, según sea la ecuación a utilizar, en comparación con los costos que nos implica obtener el CBR en laboratorio.
4. La utilización de las ecuaciones resultantes de esta investigación para obtener valores de CBR nos permite tener una idea mas clara de cual es la capacidad de soporte de todos los materiales de sub rasante a lo largo de toda nuestra carretera lo cual nos permite tomar mejor los criterios al momento de diseñar nuestro pavimento.
5. Los resultados en la obtención del CBR de diseño y el cálculo de espesores de afirmado son:

PERENTIL	CBR DE DISEÑO LABORATORIO	CBR DE DISEÑO ECUACION 4.2	CBR DE DISEÑO ECUACION 4.6
75	1,9%	2%	2,2%

LABORATORIO	ECUACIÓN 4.2	ECUACIÓN 4.6
27 in	27in	25 in

6. No existe diferencias considerables en la utilización para el diseño de CBR de laboratorio o de inferencias hechas, de este parámetro de diseño, por las ecuaciones matemáticas presentadas en el ítem 4.1 como lo apreciamos en los resultados obtenidos en el ítem 4.2.9.

REFERENCIAS:

1. "MODELOS MATEMÁTICOS PARA LA ESTIMACION DE PROPIEDADES MECÁNICAS DE LOS SUELOS Y SU APLICACIÓN AL DISEÑO DE PAVIMENTOS LOS SUELOS DEL VALLE CENTRAL DE TARIJA", Ponencia del "9º Congreso Ibero - Latinoamericano del Asfalto – Asunción"; Dr. Benítez Reinoso, Alberto; Paraguay 1997.
2. "LA INGENIERIA DE SUELOS EN LAS VIAS TERRESTRES CARRETERAS FERROCARRILES Y AEROPUERTOS"; Rico Rodríguez, Alfonso – Del Castillo, Hermilio; Editorial Limusa Noriega; México 1997.
3. "PROBABILIDAD Y ESTADISTICA PARA INGENIERIA Y CIENCIA" – Cuarta Edición; William Mendenhall – Terry Sincich; Prentice Hall; México.
4. "TEORIA Y PROBLEMAS DE PROBABILIDAD Y ESTADISTICA"; Murray R. Spiegel; McGRAW-HILL; Bogota Colombia 1984.
5. "MECANICA DE SUELOS"; Juárez Badillo – Rico Rodríguez; Editorial Limusa; México 1985.
6. TESIS DE GRADO: "DETERMINACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DE SOPORTE DE UN TERRENO DE CIMENTACIÓN DE UN PAVIMENTO POR MEDIO DE UN EQUIPO DINAMICO"; Tupia Córdova, Carlos Alberto; Lima Perú - 2001.
7. "DESIGN OF AGGREGATE SURFACED ROADS AND AIRFIELDS"; TECHNICAL MANUAL TM 5-822-12 / DEPARTMENT OF THE ARMY; Washington, DC, 28 September 1990.
8. "PAVEMENT DESIGN FOR ROADS, STREETS, WALKS, AND OPEN STORAGE AREAS"; TECHNICAL MANUAL TM 5-822-5 / DEPARTMENT OF THE ARMY; WASHINGTON, DC, 12 June 1992.
9. TESIS DE GRADO "ESTUDIO DE SUELOS, CANTERAS, FUENTES DE AGUA Y DISEÑO DE PAVIMENTOS - APLICACIÓN: CARRETERA PISCO - AYACUCHO TRAMO I: PANAMERICANA SUR - PTE PAERO - 87 KM"; PEREZ COLLANTES, ROCIO DEL CARMEN; LIMA PERU - 1992.
10. INGENIERÍA DE PAVIMENTOS PARA CARRETERAS; ING. ALFONSO MONTEJO FONSECA.
11. SOFTWARE ESTADÍSTICO MINITAB RELEASE 13.