

UNIVERSIDAD PERUANA LOS ANDES

FACULTAD DE INGENIERIA

ESCUELA ACADEMICA PROFESIONAL DE INGENIERIA
CIVIL



TESIS

“ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MATERIAL PARA BASE Y
SUB BASE DE LAS CANTERAS UMUTO Y SICAYA EN
PAVIMENTO FLEXIBLE DE SUBRASANTE DE CBR MENOR
AL 10% HUANCAYO 2017”

PRESENTADO POR:

Bach. MIRKO ALIAGA ARQUI

PARA OPTAR EL TITULO PROFESIONAL DE INGENIERO
CIVIL

HUANCAYO – PERU

2017

HOJA DE CONFORMIDAD DE LOS JURADOS

DR. CASIO AURELIO TORRES LOPEZ
PRESIDENTE

Ing. Jeannelle Sofía Herrera Montes
JURADO

Ing. María Luisa Mueras Gutierrez
JURADO

Ing. Julio Fredy Porras Mayta
JURADO

MG. Miguel Ángel, Carlos Canales
SECRETARIO DOCENTE

ASESOR

Ing. Javier Amador Navarro Véliz

DEDICADO A:

A mi madre la cual me brindo todo su apoyo y confianza, corrigiendo con amor mis faltas.

A mi abuela quien me regalo los momentos más dulces de mi infancia.

A los grandes maestros que con paciencia me brindaron sus enseñanzas.

Y a mis colegas y amigos que me acompañaron en momentos difíciles brindándome fortaleza.

ÍNDICE

	Pág.
ÍNDICE.....	<i>vii</i>
ÍNDICE DE FIGURAS.....	<i>xiv</i>
ÍNDICE DE TABLAS.....	<i>xvi</i>
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	<i>xix</i>
RESUMEN.....	<i>xxi</i>
ABSTRACT.....	<i>xxiii</i>
INTRODUCCIÓN.....	<i>xxv</i>

CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	27
1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA.....	28
1.2.1. PROBLEMAS GENERAL.....	28
1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS.....	29
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN:.....	29
1.3.1. OBJETIVO GENERAL.....	29
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	29
1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN.....	30
1.4.1. SOCIAL.....	30
1.4.2. METODOLÓGICA.....	30
1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	31
1.5.1. ESPACIAL.....	31

1.5.2. TEMPORAL.....	31
1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	31
1.6.1. LIMITACIÓN ECONÓMICA.....	31
1.6.2. LIMITACIÓN TEMPORAL	31
1.6.3. LIMITACIÓN TECNOLÓGICA.....	32
2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO	33
2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES.....	33
2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES	35
CAPITULO II MARCO TEÓRICO	
2.2. BASES TEÓRICAS DE VARIABLES E INDICADORES.....	36
2.2.1. ENSAYOS SOLICITADOS POR LA NORMA CE. 010, PAVIMENTOS URBANOS.....	36
A. Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado, Norma ASTM D - 422	37
B. Limite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos Norma ASTM D 4318.....	39
C. Ensayo de Abrasión por medio de la Máquina de los Ángeles, NORMA ASTM C-131 y ASTM C-535	40
D. CBR de Suelos en Laboratorio, Norma ASTM D 1883.....	41
E. Equivalente de Arenas y Agregados Finos, NORMA ASTM D-2419.....	43
F. RELACIONES HUMEDAD DENSIDAD (PRÓCTOR MODIFICADO) ASTM D-1557	44
G. Índice de Aplanamiento y Alargamiento de Agregados para Carreteras, NORMA MTC E221-1999.....	45
2.2.2. MÓDULO RESILIENTE.....	46

A. Correlaciones existentes de Módulo Resiliente con el CBR.....	47
2.2.3. REQUERIMIENTOS DE CALIDAD BASE Y SUB BASE, NORMA CE. 010	
PAVIMENTOS URBANOS.	48
a. Material granular para la sub base granular.....	48
b. Material granular para la base granular.....	49
2.2.4. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO.....	50
2.2.5. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO FLEXIBLE	51
2.2.6. ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE	51
2.2.3.1. Capa de rodadura	52
2.2.3.2. Base Granular.....	52
2.2.3.3. Sub Base	52
2.2.3.4. Subrasante.....	53
2.2.7. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS	53
2.2.8. PESO VEHICULAR	55
2.2.9. TRAFICO PRESADO EXPRESADO EN EE EN EL CARRIL DE DISEÑO	56
2.2.10. INFLUENCIA DE LA BASE Y SUB BASE EN EL COMPORTAMIENTO DEL	
PAVIMENTO	61
a. Pista de prueba en Alconbury Hill (Inglaterra).....	61
b. Evaluación estructuras típicas de pavimento flexible, Islandia.....	62
2.2.11. CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LAS VÍAS	
URBANAS	64
2.2.12. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO	
FLEXIBLE.....	65
2.2.13. ESTADOS TENSIONALES EN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO,	
ESFUERZOS, DEFORMACIONES Y DEFLEXIONES DE SERVICIO.....	65

A. Esfuerzo Vertical, (σ_z).....	65
B. Deformación Radial, (ϵ_r)	66
C. Deformación Vertical (ϵ_z).....	67
D. Deflexiones, (Δz).....	68
2.2.14.CRITERIOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS.....	69
A. Control de fatiga.....	69
B. Control de deformación o ahullamiento.....	69
C. Control de deflexión	69
2.2.15.ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO PAVIMENTO FLEXIBLE.....	70
A. MODELO DE BURMISTER.....	72
B. Estudios realizados en sistema multicapa.....	73
2.2.16.ECUACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS, DEFORMACIONES Y DEFLEXIONES DE SERVICIO EN EL INTERIOR DEL PAVIMENTO FLEXIBLE.....	78
A. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN EL INTERIOR DEL PAVIMENTO	78
B. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS RADIAL EN EL INTERIOR DEL PAVIMENTO	81
C. ESTIMACIÓN DE DEFORMACIONES VERTICAL EN EL INTERIOR DEL PAVIMENTO	81
D. ESTIMACIÓN DEFORMACIÓN RADIAL TANGENCIAL BAJO EL CENTRO DE LA PLACA	82

E. ESTIMACIÓN DE DEFLEXIONES EN EL INTERIOR DEL PAVIMENTO	83
2.2.17. ESTIMACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES Y DEFLEXIONES ADMISIBLES	84
A. Criterio de esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, $\sigma_z adm$	84
B. Criterio de la Shell para la determinación de la deformación vertical admisible de compresión en la subrasante, $\epsilon_z adm$	86
C. Criterio de la Shell para la determinación de la deformación radial de tracción admisible en la base de la capa asfáltica, $\epsilon_r adm$	86
D. Deflexión vertical admisible en la superficie, $(\Delta z adm)$	87
2.3. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN	88
2.4. MARCO CONCEPTUAL	89
2.5. SISTEMA DE VARIABLES	91
2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	91
 CAPITULO III METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN	
3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN	93
3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN	93
3.3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN	93
3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	93
3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA	95
3.7. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN	95
3.6.1. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	95
3.6.2. TÉCNICAS DE CAMPO:	96
3.8. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN	97

3.9. CRITERIO DE VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS.....	98
3.10. PROCESO DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MATERIAL DE CANTERA PARA BASE Y SUB BASE, PAVIMENTO FLEXIBLE.....	99
A. APLICACIÓN DEL PROGRAMA BISAR 3.0	100
CAPITULO IV PRESENTACIÓN DE RESULTADOS	
4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS CANTERAS	101
A. Cantera Umuto	101
B. Cantera Sicaya	102
4.2. UBICACIÓN DE ZONAS CON SUELO DE CARACTERÍSTICA DE CBR REGULAR.....	103
4.3. ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CANTERAS UMUTO Y SICAYA.....	105
A. Análisis granulométrico por tamizado, Norma ASTM D 422.....	105
B. Límites de consistencia, Norma ASTM D4318	106
C. Clasificación del material granular.....	106
D. Sales solubles totales, Método MTC E 219.....	107
E. Abrasión los ángeles, Norma ASTM C 131	107
F. Ensayo Próctor Modificado, Norma ASTM D-1557	108
G. Ensayo California Bearing Ratio (C.B.R.), Norma ASTM D1883-91.....	108
H. Ensayo Equivalente de Arena, Norma ASTM D 2419.....	109
I. Determinación de porcentaje con caras fracturadas MTC E 220-5821.....	109
J. Ensayo de durabilidad y ensayo de pérdida con sulfato de sodio y sulfato de magnesio.....	109
4.1. DESEMPEÑO DEL MATERIAL DE CANTERAS UMUTO Y SICAYA APLICADO EN MODELOS ESTRUCTURARLES DE PAVIMENTO FLEXIBLE.....	113
A. MODULO DE LA CARPETA ASFÁLTICA	113

B.	PROCESO DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL MATERIAL DE CANTERA	114
4.2.	CONSIDERACIONES EN LA EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE PAVIMENTO CON LA CONTRIBUCIÓN DEL MATERIAL DE CANTERAS.....	115
A.	Esfuerzo Vertical sobre la subrasante (ϵ_z).....	116
B.	Deformación Vertical sobre la subrasante (ϵ_z).....	123
C.	Deformación Radial en la interface carpeta asfáltica – base granular.....	125
D.	Deflexión de la estructura	127
CAPITULO V DISCUSIÓN DE RESULTADOS		
5.1.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS.....	130
A.	HIPÓTESIS GENERAL	130
B.	HIPÓTESIS ESPECIFICA NRO.01	133
C.	HIPÓTESIS ESPECIFICA NRO.02	134
5.2.	IMPLICACIÓN PRÁCTICAS	142
5.3.	LIMITACIONES.....	143
5.4.	APORTE EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE	
AASHTO 93		144
5.5.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN	146
	CONCLUSIONES.....	148
	RECOMENDACIONES	150
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	151

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Nro. 1: Entorno de la Gradación A	38
Figura Nro. 2: Curva relación humedad densidad	45
Figura Nro. 3: Correlaciones típicas entre las clasificaciones y propiedades de los suelos con el Modulo de Resiliencia.	47
Figura Nro. 4: Estructura típica del pavimento flexible	52
Figura Nro. 5: Peso Máximo Por Eje o Conjunto De Ejes	56
Figura Nro. 6: Espesores propuestos, Catalogo de estructuras de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente, periodo de diseño 20 años, Tp0 al Tp7.	59
Figura Nro. 7: Espesores propuestos, Catalogo de estructuras de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente, periodo de diseño 20 años, Tp8 al Tp14.	60
Figura Nro. 8: Evolución de deformaciones permanentes Transport Research Laboratory (TRL) en Alconbury Hill, Inglaterra.	62
Figura Nro. 9. Estructuras de pavimento flexible, ensayo HVS.	63
Figura Nro. 10: Resultados de deformación, estructuras ensayadas en un HVS.	63
Figura Nro. 11: Transmisión de esfuerzos, pavimentos flexible	65
Figura Nro. 12: Distribución de esfuerzos debido a una carga puntual.	66
Figura Nro. 13: Representación deflexión, estructura del pavimento.	68
Figura Nro. 14: Distribución de esfuerzos verticales en forma de bulbo de presiones, pavimento flexible.	72
Figura Nro. 15: Distribución de esfuerzos tangenciales y verticales en un sistema de dos capas. Esfuerzos tangenciales en un sistema bicapa, de módulos de elasticidad diferentes. Planteado por Burmister.	73

Figura Nro. 16: Representación de la transformación de un sistema multicapa a su equivalente monocapa.	75
Figura Nro. 17: Distribución de esfuerzos verticales medio semi infinito (Boussinesq)	79
Figura Nro. 18: Distribución de presiones medio semi infinito (Boussinesq)	80
Figura Nro. 19: Ubicación cantera Umuto	101
Figura Nro. 20: Ubicación cantera Sicaya	102
Figura Nro. 21: CBR de subrasante en distritos	103
Figura Nro. 22: Curva granulométrica Cantera Umuto	105
Figura Nro. 23: Curva granulométrica Cantera Sicaya	105
Figura Nro. 24: Temperatura máxima promedio multianual	113
Figura Nro. 25: Proceso, Análisis del comportamiento del pavimento flexible.	115
Figura Nro. 26: Contribución en disminución de esfuerzos verticales, Rueda simple	121
Figura Nro. 27: Criterio CRR de Bélgica, esfuerzo vertical actuante sobre la subrasante. Rueda simple	121
Figura Nro. 28: Contribución en disminución de esfuerzos verticales, Rueda doble	122
Figura Nro. 29: Criterio CRR de Bélgica, esfuerzo vertical actuante sobre la subrasante. Rueda doble	122
Figura Nro. 30: Deformación vertical sobre la subrasante. Rueda simple.....	124
Figura Nro. 31: Deformación vertical sobre la subrasante. Rueda doble	124
Figura Nro. 32: Criterio SHELL, deformación radial. Rueda simple	126
Figura Nro. 33: Criterio SHELL, deformación radial. Rueda doble	126
Figura Nro. 34: Criterio Huang, deflexión de la estructura. Rueda simple.....	128
Figura Nro. 35: Criterio Huang, deflexión de la estructura. Rueda doble	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla Nro. 1: Requerimientos Granulométricos, Norma CE. 010.....	38
Tabla Nro. 2: Peso de agregado y Número de Esferas para agregados gruesos hasta de 1 ½” (Ensayo de Abrasión ASTM C-131).....	41
Tabla Nro. 3: Gradación para Sub Base Granular.....	48
Tabla Nro. 4: Requerimientos de Calidad para Sub Base granular.....	49
Tabla Nro. 5: Granulometría para Base Granular.....	49
Tabla Nro. 6: Valor Relativo de Soporte CBR	49
Tabla Nro. 7: Requerimientos del Agregado Grueso de Base Granular.....	50
Tabla Nro. 8: Requerimientos del Agregado Fino de Base Granular.	50
Tabla Nro. 9: Numero de repeticiones acumuladas de ejes equivalentes de 8.2 t, en el carril de diseño, Tp0 a Tp4.....	57
Tabla Nro. 10: Numero de repeticiones acumuladas de ejes equivalentes de 8.2t, en el carril de diseño, Tp5 a Tp14.....	58
Tabla Nro. 11: Coeficiente de Calage	87
Tabla Nro. 12: VARIABLE INDEPENDIENTE (Y): Material para base y sub base.....	92
Tabla Nro. 13: VARIABLE DEPENDIENTE (X): Pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10%.....	92
Tabla Nro. 14: CBR en diferentes distritos de Huancayo	104
Tabla Nro. 15: Limite de consistencia. Canteras: Umuto y Sicaya	106
Tabla Nro. 16: Clasificación del material para base y sub base. Canteras: Umuto y Sicaya	106
Tabla Nro. 17: sales solubles totales. Canteras: Umuto y Sicaya	107

Tabla Nro. 18: Abrasión los Ángeles. Canteras: Umuto, Sicaya	108
Tabla Nro. 19: Próctor modificado. Canteras: Umuto, Sicaya	108
Tabla Nro. 20: Ensayo California Bearing Ratio. Canteras: Umuto, Sicaya	109
Tabla Nro. 21: Porcentaje con caras fracturadas. Cantera Umuto y Sicaya	109
Tabla Nro. 22: Porcentaje con caras fracturadas. Cantera Umuto y Sicaya	110
Tabla Nro. 23: Resumen Resultado de E.M.S. Cantera Umuto. Material para Base y Sub Base Granular.....	111
Tabla Nro. 24: Resumen Resultado de E.M.S. Cantera Sicaya. Material para Base y Sub Base Granular.....	112
Tabla Nro. 25: Coeficientes de Poisson, ingeniería de pavimentos.	116
Tabla Nro. 26: Análisis del comportamiento del esfuerzo vertical. Material de la cantera Umuto en Kg/cm ² para una rueda simple.	118
Tabla Nro. 27: Análisis del comportamiento del esfuerzo vertical. Material de la cantera Sicaya en Kg/cm ² para una rueda simple.....	118
Tabla Nro. 28: Análisis del comportamiento del esfuerzo vertical. Material de la cantera Umuto en Kg/cm ² para una rueda doble.....	120
Tabla Nro. 29: Análisis del comportamiento del esfuerzo vertical. Material de la cantera Sicaya en Kg/cm ² para una rueda doble.	120
Tabla Nro. 30: Resumen del análisis, deformación vertical sobre la subrasante. Material de las canteras Umuto y Sicaya	123
Tabla Nro. 31: Resumen del análisis, deformación radial. Material de las canteras Umuto y Sicaya.	125
Tabla Nro. 32: Resumen del resultado, deflexión sobre tipos de estructura. Canteras: Umuto, Sicaya.....	127

Tabla Nro. 33: Disminución de esfuerzo vertical, debido a la base y sub base, Umuto.....	136
Tabla Nro. 34: Disminución de esfuerzo vertical, debido a la base y sub base, Sicaya	139
Tabla Nro. 35: Resumen de observaciones realizadas	141
Tabla Nro. 36: Propuesta de solución para los modelos de pavimento observados. Material cantera Sicaya.....	143

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación Nro. 1: Determinación del Índice de Plasticidad	39
Ecuación Nro. 2: Estimación de CBR.....	42
Ecuación Nro. 3: Ecuación de correlaciones del CBR con el Módulo Resiliente.....	48
Ecuación Nro. 4: Correlación, espesores equivalentes Odemark	74
Ecuación Nro. 5: Ecuación de correlación, espesores equivalentes Odemark	75
Ecuación Nro. 6: Ecuación para espesores equivalentes Odemark, simplificados	76
Ecuación Nro. 7: Módulo de Elasticidad Equivalente, Odemark, Palmer-Barber.....	76
Ecuación Nro. 8: Deflexión estimada con la Elasticidad Equivalente	77
Ecuación Nro. 9: Esfuerzos verticales, Joseph Boussinesq.....	78
Ecuación Nro. 10: Esfuerzos radiales	81
Ecuación Nro. 11: Deformaciones vertical.....	81
Ecuación Nro. 12: Deformaciones vertical, simplificada.....	82
Ecuación Nro. 13: Deformación radial tangencial.....	82
Ecuación Nro. 14: Deformación Radial Tangencial, Simplificada.....	83
Ecuación Nro. 15: Esfuerzo vertical admisible, Criterio de Dormon y Kerhoven	85
Ecuación Nro. 16: Esfuerzo vertical admisible, Criterio de la CRR de Bélgica.....	85
Ecuación Nro. 17: Deformación Vertical Admisible, Criterio de la Shell. Nivel de confianza del 50%	86
Ecuación Nro. 18: Deformación Vertical Admisible, Criterio de la Shell. Nivel de confianza del 85%	86
Ecuación Nro. 19: Deformación Vertical Admisible, Criterio de la Shell. Nivel de confianza de confianza del 95%.....	86

Ecuación Nro. 20: Criterio de la Shell, deformación radial de tracción admisible.....	86
Ecuación Nro. 21: Deflexión vertical admisible en la superficie, Yang H. Huang	88

RESUMEN

La tesis titulada “Análisis comparativo del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en pavimento flexible de subrasante de CBR menor al 10% Huancayo 2017”, parte del problema: ¿Cuáles son los resultados de la evaluación del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG?, cuyo objetivo general es de analizar los resultados de la evaluación del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% mostrado en el catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG, la hipótesis principal que debe contrastar es: con el empleo del material de la cantera Sicaya se podrá diseñar mejores modelos de pavimentos flexibles en subrasante de CBR menor al 10% empleando el catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.

La investigación es de tipo aplicada, de nivel descriptivo, exploratorio y explicativo, siendo de diseño experimental. La población son las canteras para base y sub base del valle del Mantaro de la región Junín siendo la muestra intencionada, material representativo para la realización de los ensayos de laboratorio de las canteras Umuto y Sicaya.

En conclusión de acuerdo a la hipótesis principal: el material de la cantera Sicaya reúne los requisitos de la Norma CE.010 para su empleo como sub base y como base solo en vías locales y conectoras, los modelos de pavimento para los tipos de tráfico Tp0 y Tp1 requieren un aumento de espesores, debido a excesivos esfuerzos verticales sobre la subrasante de acuerdo al criterio de la CRR de Bélgica y se debe evitar su empleo en vías de tipo de tráfico mayor a un Tp11, debido a excesivas deflexiones según el criterio de Yang Huang.

Palabras claves: Pavimento flexible, material para base y sub base, estados tensionales, desempeño estructural.

Bach. Mirko Aliaga Arqui

ABSTRACT

The thesis entitled "Comparative analysis of the material for base and sub base of the quarries Umuto and Sicaya in flexible pavement of subgrade of CBR less than 10% Huancayo 2017", part of the problem: What are the results of the evaluation of the material for base and sub base of the Umuto and Sicaya quarries in the CBR subgrade low flooring models of less than 10% of the catalog of flexible pavement structures of the ICG PT-62 manual, whose general objective is to analyze the results of the evaluation of the material for base and sub base of quarries Umuto and Sicaya in the models of flexible pavements of CBR subgrade less than 10% shown in the catalog of flexible pavement structures of the manual PT-62 of the ICG, the main hypothesis that should contrast is: With the use of Sicaya quarry material, better models of flexible pavements in subgrade of CBR less than 10% can be designed using the catalog of flexi pavement structures. of the ICG PT-62 manual.

The research is of applied type, descriptive level, exploratory and explanatory, being of experimental design. The population is the quarries for base and sub base of the Mantaro valley of the Junín region being the intended sample, representative material for the realization of the laboratory tests of the Umuto and Sicaya quarries.

In conclusion according to the main hypothesis: the Sicaya quarry material meets the requirements of the CE.010 Standard for its use as a sub base and as a base only in

local roads and connectors, the pavement models for traffic types Tp0 and Tp1 require an increase in thickness, due to excessive vertical stresses on the subgrade according to the criterion of the RRC of Belgium and its use on roads of type of traffic greater than a Tp11, due to excessive deflections according to the criterion of Yang Huang.

Keywords:Flexible pavement, base and sub base material, tensional states, structural performance.

INTRODUCCIÓN

La presente tesis lleva por título, “Análisis comparativo del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en pavimento flexible de subrasante de CBR menor al 10% Huancayo 2017” donde se realiza el análisis y evaluación del material a partir de los requerimientos de calidad citados en la norma CE. 010 Pavimentos Urbanos del Reglamento Nacional de Edificaciones y la evaluación de la contribución del material para base y sub base de las canteras mencionadas, en la disminución de los estados tensionales para un adecuado desempeño de las estructuras de pavimento flexible, esto a partir de las ecuaciones planteadas por el método racional empleados en el programa BISAR 3.0 para estimar los esfuerzos verticales actuantes sobre la subrasante, deformaciones y deflexiones y así evitar la formación de ahullamientos y deformaciones en la estructura del pavimento. Los modelos de pavimento flexible tomados para el análisis son los propuestos por el ICG en su manual PT-62 del ICG, Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección: Suelos y Pavimentos.

La presente tesis consta de los siguientes capítulos:

En el Capítulo I, Se plantea el problema, caracterizándolo y delimitándolo en función a los alcances y efectos que el tema de investigación pretende establecer y su incidencia en las medidas correctivas que la población debe ejecutar. Así mismo se define el problema de estudio, así como se precisa los objetivos que persigue la investigación.

En el Capítulo II, se toca los fundamentos teóricos de la investigación, partiendo desde el enfoque histórico y conceptual tomado por diversos investigadores en el tiempo, los ensayos requeridos por la norma CE.010 para la caracterización del material de cantera, además de las ecuaciones empleadas en la determinación de los esfuerzos verticales, deformaciones y deflexiones en el interior de la estructura del pavimento.

En el Capítulo III, Se sintetiza el proceso metodológico, señalando las técnicas y procedimientos que se han utilizado en el desarrollo de la investigación.

En el Capítulo IV, Se presenta el análisis y los resultados de la investigación,

En el Capítulo V. Se presentan la discusión de los resultados del análisis comparativo del material para base y sub base de las canteras analizadas.

Y finalmente las conclusiones y recomendaciones en función al desarrollo de la tesis.

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Es común ver en nuestra ciudad deterioros prematuros en las estructuras de pavimento flexible, las cuales no alcanza a completar su tiempo de servicio, por lo que el pavimento necesite de reparaciones antes de lo estimado, generando gastos.

Esto se debe a diversos factores, entre ellos, al empleo de un material inadecuado para base y sub base, deficientes espesores de las capas que constituyen al pavimento, las características de una subrasante regular a insuficiente entre otros. Lo cual contribuye a la formación de ahullamiento y deformaciones en la estructura del pavimento.

Al problema anterior se suma que el método AASHTO 93, método de diseño por el cual se estiman los espesores de las capas del pavimento flexible no brinda información referente al desempeño de la estructura de pavimento frente a la aplicación de cargas de tránsito, ni la contribución de cada componente del pavimento al sistema, es decir, que no cuantifica la

participación de la carpeta asfáltica, la base y sub base y como se ve afectada la subrasante por las cargas vehiculares. Por tal motivo la investigación se centra en la evaluación del material para base y sub base de las canteras de Umuto y cantera Sicaya en modelos de pavimento flexible de subrasante de CBR menor al 10%. Canteras elegidas por su importancia en distribución de material para base y sub base en diversas obras de la ciudad. Procediendo con la caracterización del material de las canteras y la aplicación de ecuaciones para el análisis de las estructuras de pavimento flexible.

Estas ecuaciones fueron tomadas de los métodos de análisis para estructuras de pavimento flexible, permitiendo así evaluar los espesores de las capas del pavimento en función a: esfuerzos verticales, deformaciones radiales, deformaciones verticales y deflexiones en la estructura del pavimento de subrasante de CBR menor al 10% en función a los criterios recomendados y con la aplicación del programa Bisar 3.0.

1.2. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1. PROBLEMAS GENERAL

¿Cuáles son los resultados de la evaluación del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG?

1.2.2. PROBLEMAS ESPECÍFICOS

- a) ¿Qué requisitos de calidad cumple el material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya para su empleo en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG?
- b) ¿Cuáles son los resultados del desempeño estructural del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG?

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN:

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar los resultados de la evaluación del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% mostrado en el catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Evaluar si el material para base y sub base de las canteras de Umuto y Sicaya cumple con los requisitos de calidad para su empleo en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% mostrado en el catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.

b) Evaluar si el material para base y sub base de las canteras de Umuto y Sicaya posee un adecuado desempeño estructural en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% mostrado en el catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.

1.4. JUSTIFICACIÓN E IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1. SOCIAL

La presente investigación contribuye al bienestar de la comunidad, ya que brinda información de utilidad que podrá ser empleado en el proceso de diseño y análisis de pavimentos flexibles, lo cual contribuirá al diseño de pavimentos de mayor durabilidad y que cumplan su vida útil.

1.4.2. METODOLÓGICA

La metodología será aplicada, se elaborara instrumentos para la investigación con la finalidad de recopilar e interpretar la información que se obtendrá de los diversos ensayos realizados al material granular la evaluación con la aplicación de las ecuaciones de la mecánica de pavimentos para el análisis de los modelos de pavimento flexible analizados.

1.5. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. ESPACIAL

La investigación compromete a los distritos de Huancayo cercanos a la zona de distribución del material para base y sub base de las canteras analizadas y que posean la característica de subrasante de CBR menor al 10%.

1.5.2. TEMPORAL

Se han recogido datos para la investigación en el mes de Octubre del año 2017.

1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1. LIMITACIÓN ECONÓMICA

Se vio un excesivo costo para la realización de los ensayos especiales de laboratorio, la determinación del módulo Resiliente para la base, sub base y subrasante y el módulo de la carpeta asfáltica son ensayos de excesivo costo económico, no obstante las correlaciones y ecuaciones empleadas en el análisis del comportamiento los modelos de pavimento presentan resultados confiables, pudiendo emplearse dicho análisis en la etapa de evaluación y diseño de espesores de pavimento flexible.

1.6.2. LIMITACIÓN TEMPORAL

Los resultados obtenidos de la presente tesis pueden ser optimizados con la adición de factores de ajuste, este proceso tomaría varios años

debido al análisis exhaustivo de los diversos modelos de pavimento flexible.

1.6.3. LIMITACIÓN TECNOLÓGICA

En el país no se disponen de los equipos de laboratorio necesarios para la determinación de los coeficientes de los materiales que constituirán la estructura del pavimento, no obstante se emplean ecuaciones que correlaciona el CBR con el módulo de elasticidad en suelos y valores recomendados por diversos autores. En el caso del coeficiente de Poisson y los resultados obtenidos por INVIAS Colombia para el empleo del coeficiente del módulo de la carpeta asfáltica a una temperatura dada, esto porque en nuestro país no se realizaron estudios similares en la evaluación de la carpeta asfáltica.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DEL ESTUDIO

2.1.1. ANTECEDENTES INTERNACIONALES

- a) En la Universidad Politécnica de Madrid se presentó la tesis doctoral titulada: “ESTUDIO DE LOS MATERIALES GRANULARES UTILIZADOS EN CAPAS DE BASE Y SUB BASE EN CARRETERAS”. Desarrollada por Rivas Cervera, Manuel en el año 1998 para optar el Título de Doctor en Ingeniería de Caminos en Madrid, España. En su estudio muestra el grado de influencia de las cualidades físicas y petrográficas de los áridos, las que constituyen la base y sub base en obras viales. Resalta el proceso de análisis estructural de capas granulares en su estructura en la cual utilizo software de la época. Detallando una serie de ensayos utilizados para definir de manera directa el comportamiento del material granular. (Rivas, 1998)

b) En la Universitaria del Ministerio de Educación Superior de la República de Cuba se presentó la tesis titulada: “PROCEDIMIENTO PARA EL DISEÑO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS FLEXIBLES REHABILITADOS EN CUBA CON EL EMPLEO DE BASES RECICLADAS UTILIZANDO LIGANTES ASFÁLTICOS” desarrollada por el Ing. Moll Martínez, Reynier en el año 2016 para optar el grado científico de Doctor en Ciencias Técnicas en La Habana, Cuba. En la tesis se detalla los análisis realizados para estimar las tensiones, deformaciones y desplazamientos que experimenta el pavimento dentro de su estructura, las diferencias entre los métodos de diseño de pavimento: diseño empírico y diseño racional, cita el coeficiente de Poisson empleado en la ingeniería de pavimentos, el estudio se centra en la evaluación de deflexiones de los tramos de pavimento analizados, detallando el proceso de evaluación de los pavimentos con bases recicladas. (Moll, 2016)

c) En la Universidad de las Fuerzas Armadas – ESPE se presentó la tesis titulada: “DEFINICIÓN MODERNA DE LOS PARÁMETROS PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS”. Desarrollada por Hidalgo, Felipe en el año 2007 para optar el Título de Ingeniero Civil en Sangolqui, Ecuador. Muestra el proceso de análisis de la estructura de pavimento flexible y rígido partir del empleo de ecuaciones de la mecánica de pavimentos, estas ecuaciones se fundamentan a partir de hipótesis de sistemas de pavimento mono capa, bicapa y multicapa. El desempeño de las diversas capas de pavimento y el

factor condicional de la subrasante tanto en el espesor de la carpeta asfáltica, la base y sub base. (Hidalgo, 2007)

Para el desarrollo del análisis recomienda el empleo de ecuaciones de correlación (Modulo de elasticidad – CBR), y que el empleo de la presión de contacto de la rueda del vehículo con el pavimento sea igual a la presión de inflado de la rueda. Concluye en la evaluación de los estados tensionales actuantes en la estructura del pavimento. (Hidalgo, 2007)

2.1.2. ANTECEDENTES NACIONALES

- a) En la Universidad de Piura se presentó la tesis titulada: “CÁLCULO DEL ÍNDICE DE CONDICIÓN DEL PAVIMENTO FLEXIBLE EN LA AV. LUIS MONTERO DISTRITO DE CASTILLA”. Desarrollada por Rodríguez, E. en el año 2009 para optar el Título de Ingeniero Civil en Piura, Perú. Analiza las causas de las fallas más comunes que afectan a los pavimentos urbanos flexibles.

Siendo en su mayoría un deficiente diseño del paquete estructural, la falta de calidad de los materiales empleados, los diversos errores constructivos, de un deficiente sistema de drenaje en caso de precipitaciones en la base y sub base, y el efecto de solicitaciones externas como carga vehicular y agentes climáticos, entre otros. (Rodríguez, 2009)

Se describe la importancia de la sub base como la base las cuales se encargan de soportar, transmitir y distribuir con uniformidad las

cargas aplicadas en la carpeta asfáltica. Además, refiere sobre la importancia de la sub base que controla los cambios de volumen y elasticidad del material del terreno de fundación, que serían dañinos para el pavimento. (Rodríguez, 2009)

b) En la Universidad Nacional de Ingeniería se presentó la tesis titulada: “MODELACIÓN GEOTÉCNICA DE PAVIMENTOS FLEXIBLES CON FINES DE ANÁLISIS Y DISEÑO EN EL PERÚ”. Desarrollada por Gutiérrez, J. en el año 2007 para optar el Título de Ingeniero Civil en Lima, Perú. Muestra el proceso de evaluación en el diseño de pavimentos, señala que se deben tener en cuenta determinados factores especiales en el diseño de pavimentos, como son: la ubicación geográfica, tipos de suelos y ensayos de mecánica de suelos especiales. Hace referencia a que las condiciones climáticas de la zona determinan la solicitud de realización de ensayos especiales con finalidad de diseño, al punto que en algunos casos se necesita de ensayos de resistencia al esfuerzo cortante y otros hasta de consolidación para medir asentamientos de la estructura del pavimento. (Gutiérrez, 2007)

2.2. BASES TEÓRICAS DE VARIABLES E INDICADORES

2.2.1. ENSAYOS SOLICITADOS POR LA NORMA CE. 010, PAVIMENTOS URBANOS.

Con la finalidad de que el material granular que conformará la base y sub base granular en un pavimento flexible tenga un comportamiento adecuado a lo largo de su vida de servicio, el material deberá de

cumplir con requerimientos establecidos en la Norma CE. 010 Pavimentos Urbanos. Para la evacuación del cumplimiento de dichos parámetros se deberán de efectuar ensayos de mecánica de suelos. Dichos ensayos son citados a continuación:

A. Análisis Granulométrico de Suelos por Tamizado, Norma ASTM

D - 422

Este ensayo tiene como objetivo cuantificar la muestra de suelo en cantidades de partículas de diferentes tamaños para luego representarlas en peso y en porcentaje.

El resultado se representa gráficamente a escala semi logarítmica, esta representación se logra dibujando los porcentajes del material retenido como ordenadas y el tamaño de las partículas en las abscisas (Juarez, 2011. p. 101)

La forma de la curva granulométrica obtenida nos muestra gráficamente el tipo de suelo.

A.1. Entorno de calidad en función a las gradaciones recomendadas

El Reglamento Nacional de Edificaciones, (2014), menciona en la Norma CE.010 nombra los requerimientos de calidad de los materiales para pavimentos, en el caso de la granulometría del material para base y sub base, la Gradación A es la recomendada para alturas mayores a los 3000 msnm.

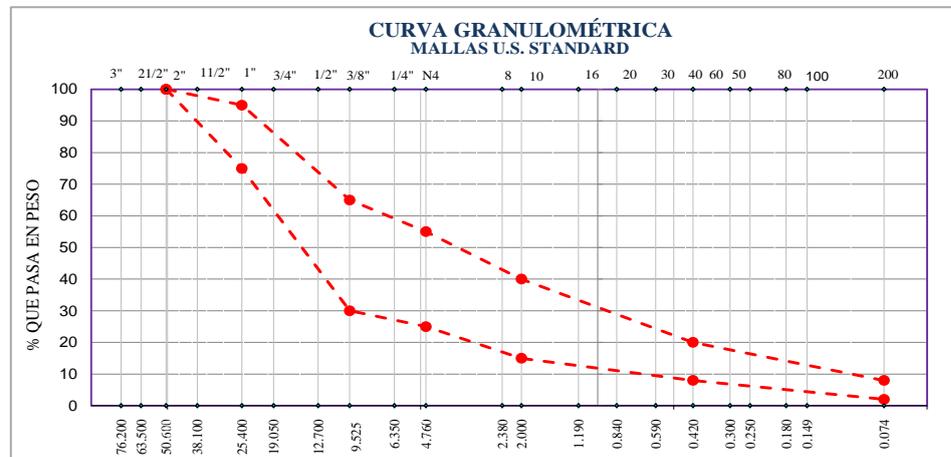
Tabla Nro. 1: Requerimientos Granulométricos, Norma CE. 010.

Tamiz	Porcentaje que Pasa en Peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm (2")	100	100	-	-
25 mm (1")	-	75-95	100	100
9.5 mm (3/8")	30-65	40-75	50-85	60-100
4.75 mm (Nº4)	25-55	30-60	35-65	50-85
2.0 mm (Nº10)	15-40	20-45	25-50	40-70
4.25 µm (Nº40)	8-20	15-30	25-30	25-45
75 µm (Nº200)	2-8	5-15	5-15	8-15

Fuente: Sección 304 de las EG-2000 del MTC

El material granular a utilizar como base y sub base debe de estar dentro del entorno de calidad recomendada por la norma, se muestra en la Figura Nro. 01 el entorno de calidad de las gradaciones mencionadas.

Figura Nro. 1: Entorno de la Gradación A



Fuente: Elaboración Propia, a partir de los datos Gradación A Sección 304 de las EG-2000 del MTC.

B. Limite Líquido, Límite Plástico e Índice de Plasticidad de Suelos

Norma ASTM D 4318

Los límites líquido y plástico se emplean para clasificar e identificar el tipo de suelo que se está analizando, con el resultado del ensayo se determina el Índice de Plasticidad de la muestra de suelo.

B.1. Limite Líquido

Es el contenido de humedad de una muestra de suelo por debajo del cual este se comporta como un material plástico. A este nivel de contenido de humedad el suelo está en el estado de transición de cambiar su comportamiento al de un fluido viscoso.

B.2. Limite Plástico

Es el contenido de humedad por debajo del cual se puede considerar el suelo como material no plástico.

B.3. Determinación del Índice de Plasticidad

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

Ecuación Nro. 1: Determinación del Índice de Plasticidad

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

Donde:

L.L. = Límite Líquido

P.L. = Límite Plástico

L.L. y L.P. son números enteros

Cuando el límite líquido o el límite plástico no puedan determinarse, el índice de plasticidad se informará con la

abreviatura NP (no plástico). Así mismo, cuando el límite plástico resulte igual o mayor que el límite líquido, el índice de plasticidad se informará como NP (no plástico).

C. Ensayo de Abrasión por medio de la Máquina de los Ángeles, NORMA ASTM C-131 y ASTM C-535

Mediante el ensayo se determina el porcentaje de desgaste de los agregados de tamaños menores a 37.5 mm (1 ½") y agregados gruesos de tamaños mayores de 19 mm (¾") esto por medio del empleo de la máquina de Abrasión los Ángeles. (Minaya, 2001. p.13).

C.1. Material y carga abrasiva a utilizar

La cantidad de material a ensayar y el número de esferas a incluir dependen de la granulometría del agregado grueso. En la tabla Nro. 2 se muestra el método a emplear; así como la cantidad de material, número de esferas, número de revoluciones y tiempo de rotación, para cada uno de ellos. La gradación que se use deberá ser representativa de la gradación original del material suministrado para la obra.

Tabla Nro. 2: Peso de agregado y Número de Esferas para agregados gruesos hasta de 1 ½" (Ensayo de Abrasión ASTM C-131).

MÉTODO		A	B	C	D
DIÁMETRO		CANTIDAD DE MATERIAL A EMPLEAR (gr)			
Pasa el tamiz	Retenido en tamiz				
1 ½"	1"	1 250±25			
1"	¾"	1 250±25			
¾"	½"	1 250±10	2 500±10		
½"	3/8"	1 250±10	2 500±10		
3/8"	¼"			2 500±10	
¼"	Nº4			2 500±10	
Nº4	Nº8				5 000±10
PESO TOTAL		5 000±10	5 000±10	5 000±10	5 000±10
Nº de esferas		12	11	8	6
Nº de revoluciones		500	500	500	500
Tiempo de rotación (minutos)		15	15	15	15

Fuente: Minaya, S. Ordoñez, A. (2001). *Manual de laboratorio ensayos para pavimentos volumen I*. Universidad Nacional de Ingeniería. (p. 14).

D. CBR de Suelos en Laboratorio, Norma ASTM D 1883

El ensayo CBR (ensayo de Relación de Soporte de California), permite medir la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones de humedad y densidad controladas. Con lo cual se obtiene un número referencial que relaciona el soporte pero por observaciones dadas, éste número no es constante para un suelo dado, ya que solo se aplica al estado en el cuál se encontraba el suelo durante el ensayo.

El CBR se obtiene de la relación de la carga unitaria (en lbs/plg²) necesaria para lograr una cierta profundidad de penetración del pistón (con un área de 19.4 cm²) dentro de la muestra compactada de suelo a un contenido de humedad y densidad dadas con respecto a la carga unitaria patrón requerida para obtener la misma

profundidad de penetración en una muestra estándar de material triturado. La finalidad del ensayo es la de reproducir condiciones similares al proceso de construcción. Por ello se aplica con el contenido de humedad óptimo para obtener la máxima densidad, además el suelo va a ser compactado al menos al 95%.

Ecuación Nro. 2: Estimación de CBR

$$CBR = \frac{Carga\ unitaria\ del\ ensayo}{Carga\ unitaria\ patron} \times 100$$

De ésta Ecuación Nro. 2 se puede ver que el CBR es un porcentaje de la carga unitaria patrón. Los valores de carga unitaria que deben utilizarse en la Ecuación Nro. 02 son los siguientes:

PENETRACIÓN PATRÓN		CARGA UNITARIA	
mm	in	Mpa	psi
2.5	0.10	6.9	1.000
5.0	0.20	10.3	1.500
7.5	0.30	13.0	1.900
10.0	0.40	16.0	2.300
12.7	0.50	18.0	2.600

El CBR usualmente se basa en la relación de carga para una penetración de 2.5 mm. Sin embargo, si el valor de CBR a una penetración de 5.0 mm. es mayor el ensayo debería repetirse. Si un segundo ensayo, produce nuevamente un valor de CBR mayor de 5.0 mm. de penetración, dicho valor debe aceptarse como valor final del ensayo.

Los ensayos de CBR se hacen usualmente sobre muestras compactadas con el contenido de humedad óptimo asegurando así

la máxima que se puede lograr para el suelo específico determinado.

E. Equivalente de Arenas y Agregados Finos, NORMA ASTM D-2419

Este método de ensayo asigna un valor empírico a la cantidad relativa, finura y características del material fino presente en una muestra de ensayo formado por suelo granular que pasa el tamiz N°4 (4.75 mm).

El término “Equivalente de Arena” transmite el concepto que la mayoría de los suelos granulares y agregados finos son mezcla de partículas gruesas, arenas y generalmente finos.

Para determinar el porcentaje de finos en una muestra, se incorpora una medida de suelo y solución en una probeta plástica graduada que luego de ser agitada separa el recubrimiento de finos de las partículas de arena; después de un período de tiempo, se pueden leer las alturas de arcilla y arena en la probeta.

El equivalente de arena es la relación de la altura de arena respecto a la altura de arcilla, expresada en porcentaje. Este método proporciona una manera rápida de campo para determinar cambios en la calidad de agregados durante la producción o colocación.

F. RELACIONES HUMEDAD DENSIDAD (PRÓCTOR MODIFICADO)

ASTM D-1557

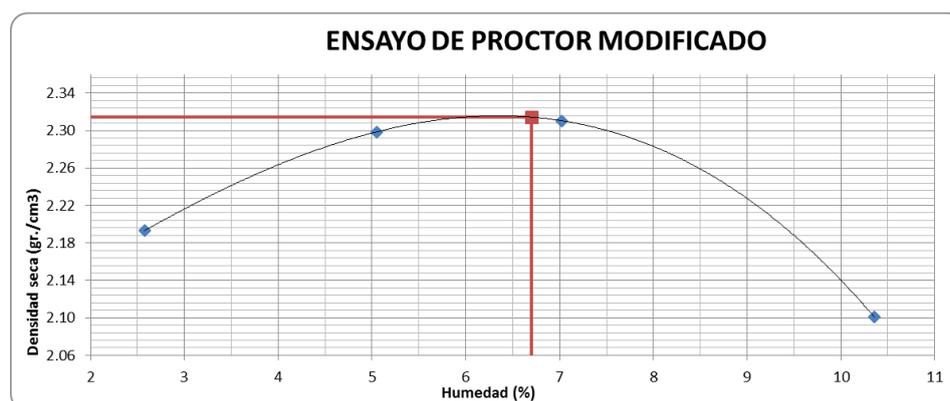
El ensayo Proctor modificado tiene como finalidad obtener la humedad óptima de compactación de un suelo para una determinada energía de compactación.

La humedad óptima de compactación es aquella humedad (% de agua) para la cual la densidad del suelo es máxima, es decir que cantidad de agua le hemos de añadir a un suelo para poderlo compactar al máximo con una energía concreta.

Para encontrar este parámetro se realizan 4 ensayos con un mismo suelo con diferentes humedades de forma que después de haber realizado las compactaciones obtendremos 4 densidades de este suelo para 4 humedades diferentes, no obstante estas no son las humedades óptimas, pero si que podemos usarlas para obtener la humedad óptima mediante interpolación.

Es decir que situando los 4 valores obtenidos en una gráfica Densidad respecto %Agua obtendremos 4 puntos que nos permitirán trazar una curva, de manera que el punto más alto de la curva será el de mayor densidad y por tanto el de la humedad óptima.

Figura Nro. 2: Curva relación humedad densidad



Fuente: elaboración propia.

Nota: Representación gráfica, Próctor modificado, se muestra que la máxima densidad seca es de 2.314 gr/cm³ a un óptimo contenido de humedad del 6.70%.

G. Índice de Aplanamiento y Alargamiento de Agregados para Carreteras, NORMA MTC E221-1999

Es determinar el porcentaje por peso de las partículas planas y alargadas. [...] Las partículas planas y alargadas son definidas respectivamente, como aquellas partículas cuya dimensión última es menor que 0.6 veces su dimensión promedio y aquellas que son mayores 1.8 veces la dimensión promedio. (Minaya, 2001, p.22)

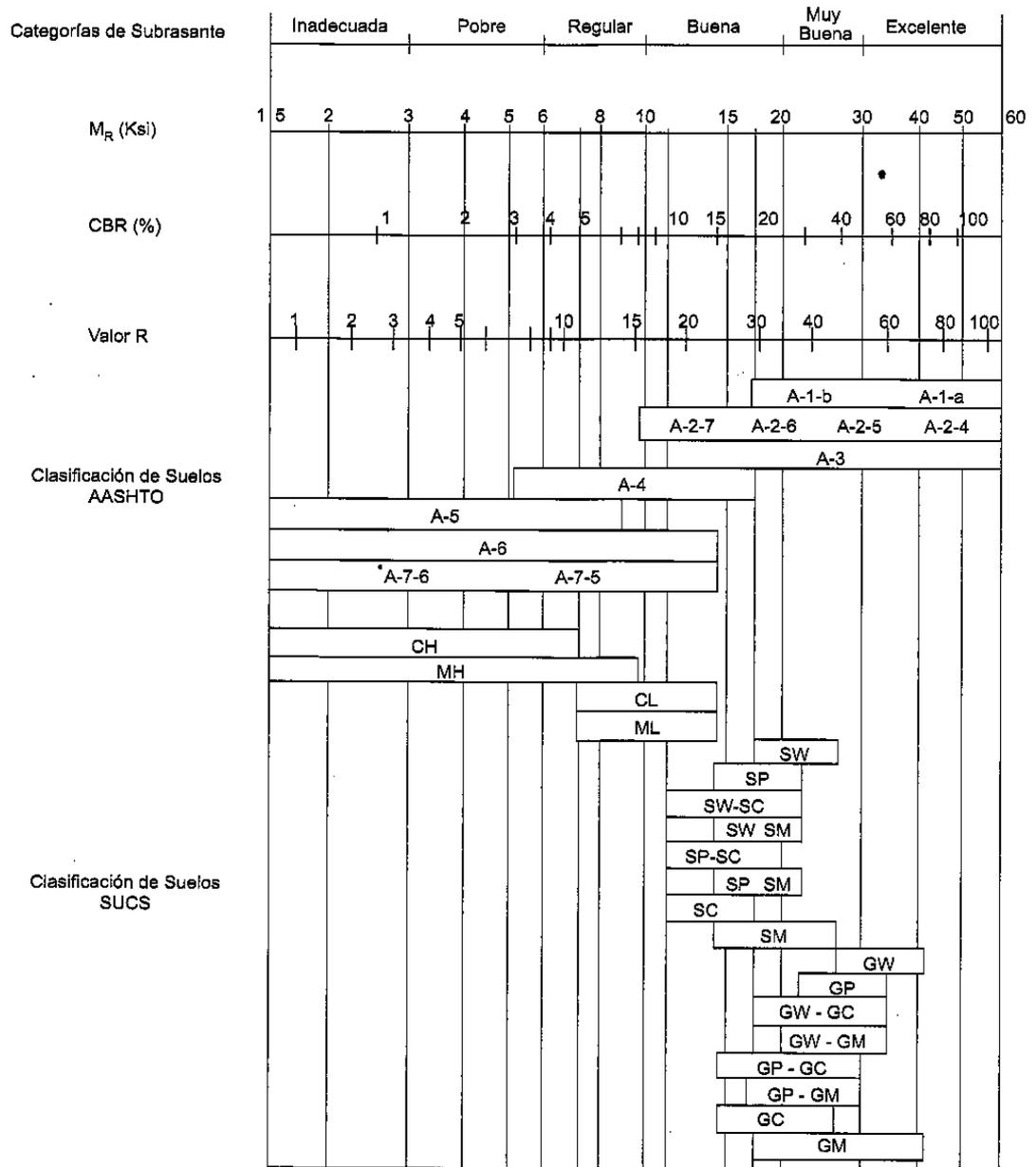
Lo mencionado por Minaya se define como el tamaño medio entre las dos aberturas 1" a 3/4", 3/4" a 1/2", 1/2" a 3/8", etc. entre las que los agregados son retenidos al ser tamizados. El material tamizado se separa usando como patrón los aparatos con la finalidad de que estas puedan ser separadas rápidamente para realizar la toma de pesos y determinar el porcentaje partículas chatas y alargadas de la muestra. (Minaya, 2001, p.22)

Las partículas planas o alargadas tienden a impedir la compactación, estas encierran a las partículas de agregados adyacentes más fácilmente que las partículas cúbicas y se resisten a una reorientación, a un aumento de densidad. Por lo tanto, un porcentaje elevado de partículas planas o alargadas puede inducir a un mayor esfuerzo de compactación requerido. (Minaya, 2001, p.22)

2.2.2. MÓDULO RESILIENTE

INVE, (2008), menciona que el ensayo de módulo resiliente, proporciona la relación básica constitutiva entre esfuerzo y deformación, de los materiales de construcción de pavimentos flexibles para su empleo en el análisis del sistema de capas en pavimentos. Se requiere de un equipo de laboratorio complejo, constituido por una cámara triaxial para ensayos cíclicos, un marco de carga con un actuador dinámico servo controlado que nos sirve para producir una onda senosoidal media en un período y frecuencia determinados; un panel de control y de mediciones de presiones de cámara, de poros y efectiva, y una unidad de adquisición de datos con software de procesamiento. La Figura Nro. 03 muestra los diferentes valores de las correlaciones realizadas a diferentes tipos de suelo.

Figura Nro. 3: Correlaciones típicas entre las clasificaciones y propiedades de los suelos con el Módulo de Resiliencia.



Fuente: Manual de Carreteras, Suelos, Geotecnia y Pavimentos. Sección: Suelos y Pavimentos. (p.30)

A. Correlaciones existentes de Módulo Resiliente con el CBR

Debido a la complejidad en la determinación del Módulo Resiliente y a lo complejo de disponer de equipos para su determinación, se idearon correlaciones empíricas con el CBR en los métodos de diseño estructural en pavimentos.

Para la determinación del Módulo resiliente (MR) se utiliza formula que correlaciona al CBR tomada de la Guía AASHTO 2002.

Ecuación Nro. 3: Ecuación de correlaciones del CBR con el Módulo Resiliente

$$M_R(\text{psi}) = 2555 \times \text{CBR}^{0.65}$$

2.2.3. REQUERIMIENTOS DE CALIDAD BASE Y SUB BASE, NORMA CE. 010 PAVIMENTOS URBANOS.

Los requerimientos de calidad que debe de cumplir el material de cantera para su empleo como material para base y sub base son citadas en la Norma CE. 010, la cual hace una clara recomendación para su empleo cuando este se encuentre a alturas mayores a los 3000 msnm.

a. Material granular para la sub base granular

Se recomienda que el material para base y sub base a emplearse en alturas superiores a los 3000 msnm se encuentren dentro del entorno de la gradación A.

Tabla Nro. 3: Gradación para Sub Base Granular

Tamiz	Porcentaje que Pasa en Peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm (2")	100	100	-	-
25 mm (1")	-	75-95	100	100
9.5 mm (3/8")	30-65	40-75	50-85	60-100
4.75 mm (Nº4)	25-55	30-60	35-65	50-85
2.0 mm (Nº10)	15-40	20-45	25-50	40-70
4.25 µm (Nº40)	8-20	15-30	25-30	25-45
75 µm (Nº200)	2-8	5-15	5-15	8-15

Fuente: Sección 304 de las EG-2000 del MTC.

Además el material granular destinado a la Sub Base deberá de cumplir con los siguientes requisitos de calidad:

Tabla Nro. 4: Requerimientos de Calidad para Sub Base granular

Ensayo	Norma	Requerimiento	
		3000 msnm	3000 msnm
Abrasión los Ángeles	NTP 400.019:2002	50% máximo	
CBR de Laboratorio	NTP 339.145:1999	30 - 40% mínimo	
Límite Líquido	NTP 339.129:1998	25% máximo	
Índice de Plasticidad	NTP 339.129:1998	6% máximo	4% máximo
Equivalente de Arena	NTP 339.146:2000	25% máximo	35% máximo
Salas Solubles Totales	NTP 339.152:2002	1% máximo	

Fuente: Sección 304 de las EG-2000 del MTC

b. Material granular para la base granular

Para el caso del material granular destinado a la Base:

Tabla Nro. 5: Granulometría para Base Granular.

Tamiz	Porcentaje que Pasa en Peso			
	Gradación A	Gradación B	Gradación C	Gradación D
50 mm (2")	100	100	-	-
25 mm (1")	-	75-95	100	100
9.5 mm (3/8")	30-65	40-75	50-85	60-100
4.75 mm (Nº4)	25-55	30-60	35-65	50-85
2.0 mm (Nº10)	15-40	20-45	25-50	40-70
4.25 µm (Nº40)	8-20	15-30	25-30	25-45
75 µm (Nº200)	2-8	5-15	5-15	8-15

Fuente: Sección 304 de las EG-2000 del MTC.

La curva de la Gradación A deberá emplearse en zonas cuya altitud sea igual o superior a los 3000 msnm.

El material cuya finalidad será la conformación de la Base Granular deberá de cumplir con las siguientes características físico – mecánicas y químicas que se indican.

Tabla Nro. 6: Valor Relativo de Soporte CBR

Vías Locales y Colectoras	Mínimo 80%
Vías Arteriales y Expresas	Mínimo 100%

Tabla Nro. 7: Requerimientos del Agregado Grueso de Base Granular

Ensayo	Norma	Requerimiento	
		3000 msnm	3000 msnm
Partículas con una cara fracturada	MTC E-210 (1999)	80% mínimo	
Partículas con dos caras fracturadas	MTC E-210 (1999)	40% mínimo	50% mínimo
Abrasión los Ángeles	NTP 400.019:2002	40% máximo	
Sales Solubles Totales	NTP 339.152:2002	0.5% máximo	
Perdida con Sulfato de Sodio	NTP 400.016:1999	-	12% máximo
Perdida con Sulfato de Magnesio	NTP 400.016:1999	-	18% máximo

Fuente: Sección 304 de las EG-2000 del MTC

Tabla Nro. 8: Requerimientos del Agregado Fino de Base Granular.

Ensayo	Norma	Requerimiento	
		3000 msnm	3000 msnm
Índice de Plasticidad	NTP 339.129:1998	4% máximo	2% máximo
Equivalente de Arena	NTP 339.146:2000	35% máximo	45% máximo
Sales Solubles Totales	NTP 339.152:2002	0.5% máximo	
Índice de Durabilidad	MTC E-214 (1999)	35% mínimo	

Fuente: Sección 304 de las EG-2000 del MTC

2.2.4. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO

El manual PT-62 del ICG, (2015, p.20) define al pavimento como una estructura de varias capas construida sobre la subrasante del camino para resistir y distribuir esfuerzos originados por los vehículos y mejorar las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito las capas son superpuestas, relativamente horizontales, las características de los materiales deben de cumplir con los requerimientos técnicos para su conformación en esta estructura.

Estas estructuras estratificadas se apoyan sobre la subrasante de la vía obtenida por el movimiento de tierras en el proceso de la exploración y que han de resistir adecuadamente los esfuerzos de las cargas repetidas del tránsito que le transmite, durante todo el periodo

para el cual fue diseñada la estructura del pavimento. (PT-62, 2015, p.20)

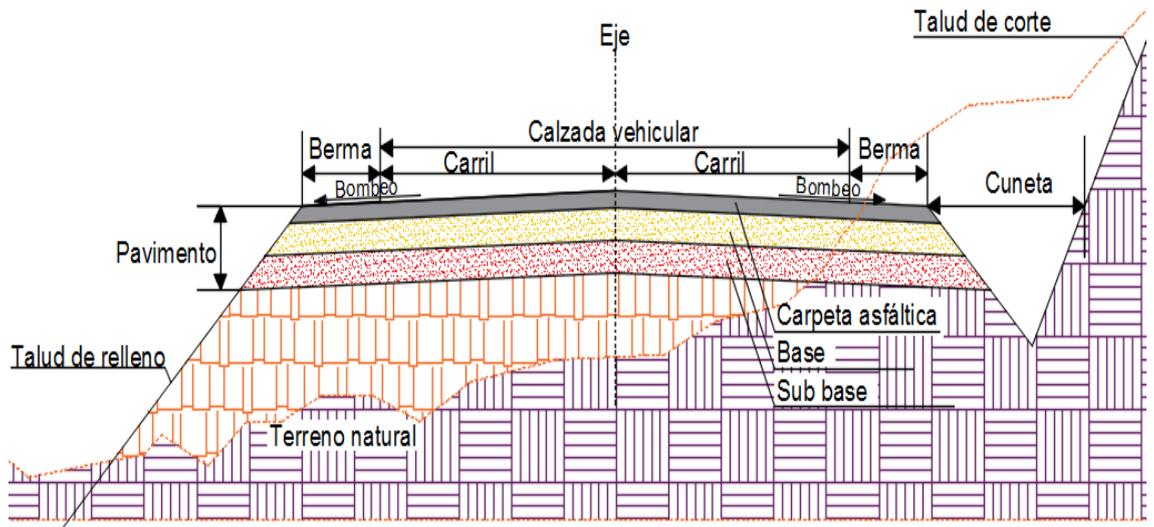
2.2.5. DEFINICIÓN DE PAVIMENTO FLEXIBLE

Compuesto por una carpeta bituminosa la cual se apoya sobre dos capas no rígidas, la base y la sub base. Cada una de ellas cumple con una función específica. La carpeta asfáltica está constituida por una mezcla bituminosa la que se encuentra apoyada sobre capas de material seleccionado llamado base granular y sub base granular. Este paquete estructural se apoya sobre la subrasante ya compactada. La función estructural del pavimento flexible es la de soportar cargas vehiculares, transmitiendo así esfuerzos verticales a todos los componentes de la estructura, las cargas producen esfuerzos y deformaciones en los elementos estructurales, siendo perjudiciales si exceden a los valores recomendables.

2.2.6. ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE UN PAVIMENTO FLEXIBLE

La función del pavimento es la de resistir y distribuir los esfuerzos originados por los vehículos mejorando así las condiciones de seguridad y comodidad para el tránsito. Por lo general está conformada por una capa de rodadura, base, sub base y subrasante.

Figura Nro. 4: Estructura típica del pavimento flexible



Fuente: Elaboración propia

2.2.3.1. Capa de rodadura

Se encarga de proteger a la base del desgaste debido a la acción del tráfico vehicular e impermeabilizar la base y protegiéndola de los cambios del contenido de humedad debido a la infiltración del agua por las lluvias. (PT-62, 2015, p.20)

2.2.3.2. Base Granular

Constituida por un material granular el cual cumple requisitos de calidad, se encuentra próxima con la superficie por lo que se le transfieren cargas más elevadas, el material granular de esta capa debe de poseer alta resistencia a la deformación. (PT-62, 2015, p.20)

2.2.3.3. Sub Base

El material que conforma a la sub base esta capa debe de ser seleccionado con la finalidad de tener mayor capacidad de soporte que la subrasante ya compactada, además de poder

evacuar el agua producto de infiltraciones o por acción de las precipitaciones pluviales. (PT-62, 2015, p.21)

2.2.3.4. Subrasante

Esta está comprendida por la superficie del terreno de fundación cuando ya se concluyó los trabajos de corte y relleno comprendidos en el movimiento de tierras. (PT-62, 2015, p.20)

2.2.7. ASPECTOS A CONSIDERAR EN EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Los diversos aspectos a considerar en el diseño de pavimentos con la finalidad de asegurar un adecuado desempeño de la vía durante su tiempo de servicio son mencionados por Chang, (2012, p.9) los cuales son nombrados a continuación:

A. ÍNDICE DE SERVICIO: Es el grado de comodidad que la vía brinda al usuario. Un parámetro usado para analizar y cuantificar el grado de servicio es el Present Serviceability Index – PSI con el que establece una escala subjetiva de calificación de 0 a 5. (Chang, 2012)

B. DURABILIDAD: El diseño debe de evitar en lo mínimo la aparición de fallas en el pavimento. En el caso de pavimentos flexibles, este puede ser diseñado para prevenir la aparición de fallas como fisuras longitudinales, transversales o en bloque, fisuramiento del tipo de piel de cocodrilo, desniveles, ahullamiento entre otros. (Chang, 2012)

C. CONFIABILIDAD: es la probabilidad de que el pavimento se comporte dentro de lo asumido en el análisis. (Chang, 2012)

D. SEGURIDAD: el pavimento debe de proveer una superficie de rodadura con la suficiente fricción para evitar la pérdida de control del vehículo por deslizamiento especialmente cuando este húmedo. (Chang, 2012)

E. MEDIO AMBIENTE El diseño de pavimento debe de considerar las influencias del medio ambiente en su desempeño, además de emplear materiales amistosos con el medio ambiente. (Chang, 2012)

F. ESTRATEGIAS DE MANTENIMIENTO: desde la etapa de diseño es necesario plantear estrategias de mantenimiento para preservar la inversión realizada en la construcción del pavimento. Estas estrategias de mantenimiento deben de ser concebidas de manera tal permitan mantener los niveles de servicio dentro de los límites tolerables. (Chang, 2012)

La presente investigación evaluó el criterio de durabilidad de la vía en función a la evaluación de los modelos de pavimento flexible con el empleo del método racional para la estimación de esfuerzos verticales.

2.2.8. PESO VEHICULAR

Es el peso máximo en carga con que se permite la circulación normal de un vehículo.

Se obtiene sumando el peso seco más la carga máxima que un vehículo está autorizado a transportar, el Reglamento Nacional de Vehículos, DECRETO SUPREMO N° 058-2003-MTC, (2003), publico la tabla de pesos y medidas donde se detallan los pesos máximos por conjunto de ejes de los diversos vehículos.

Donde el peso máximo por eje independiente o grupos de ejes permitido a los vehículos para su circulación por las vías de nuestro país, es el siguiente:

- **Eje simple:** Ensamble de dos o cuatro llantas unidas entre sí por una línea de rotación. (MTC, 2003)
- **Eje tándem (eje doble):** Eje conformado por dos líneas de rotación, dotado de una suspensión que permite la compensación de cargas. (MTC, 2003)
- **Eje trídem (eje triple):** eje conformado por tres líneas de rotación, dotado de una suspensión que permite la compensación de cargas. (MTC, 2003)

Figura Nro. 5: Peso Máximo Por Eje o Conjunto De Ejes

Conjunto de eje(s)	Nomenclatura	Simbología	Nº de Neumáticos	GRAFICO	Peso máximo por eje(s) (t)
Simple	1RS		02		7
Simple	1RD		04		11
Doble	1RS+1RD		06		16
Doble	2RS		04		12
Doble	2RD		08		18
Triple	3RS		06		16
Triple	1RS+2RD		10		23
Triple	3RD		12		25
Doble Separado	1RD+1RD		08		11+11

Nota:

RS : Rodada simple

RD : Rodada doble

Fuente: Reglamento Nacional de Vehículos, DECRETO SUPREMO N° 058-2003-MTC. (2003)

2.2.9. TRAFICO PRESADO EXPRESADO EN EE EN EL CARRIL DE DISEÑO

Dentro de la metodología de diseño, el diseño de pavimentos es mayormente influenciado por dos parámetros básicos:

- Las cargas de tráfico vehicular impuestas al pavimento.
- Las características de la subrasante sobre la que se asienta el pavimento.

La forma como se consideran estos dos parámetros dependerá de la metodología que se emplee para el diseño. El manual PT-62 del ICG, (2015, p. 86) menciona que las cargas de tráfico vehicular impuestas al pavimento están expresadas en ESALs (Equivalent Single Axle Loads 18 kips o 80 kN o 8.2 t) el cual se expresa en Ejes Equivalentes EE. La sumatoria de los ESALs durante el periodo de diseño es referida como w_{18} o ESALD, el cual es denominado como numero de repeticiones de EE de 8.2 t. El manual PT-62, (2015, p. 86) para el caso y diseño de pavimentos flexibles, define tres categorías:

A. Caminos de 150,001 hasta 1'000,000 EE, en el carril y periodo de diseño. (PT-62 - ICG, 2015, p. 86)

Tabla Nro. 9: Numero de repeticiones acumuladas de ejes equivalentes de 8.2 t, en el carril de diseño, Tp0 a Tp4

Tipos de tráfico pesado expresado en EE	Rangos de tráfico pesado expresado en EE
Tp0	>75,000 EE ≤150,000 EE
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

Fuente: Manual de carreteras suelos, geología y pavimentos sección: suelos y pavimentos (4ta ed.). 2015. Perú. Fondo editorial ICG. (p. 86).

B. Caminos de 1'000,000 hasta 30'000,000 EE, en el carril y periodo de diseño. (PT-62 - ICG, 2015, p. 86)

Tabla Nro. 10: Numero de repeticiones acumuladas de ejes equivalentes de 8.2t, en el carril de diseño, Tp5 a Tp14

Tipos de tráfico pesado expresado en EE	Rangos de tráfico pesado expresado en EE
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

Fuente: Manual de carreteras suelos, geología y pavimentos sección: suelos y pavimentos (4ta ed.). 2015. Perú. Fondo editorial ICG. (p. 87).

C. Caminos que tienen un tránsito mayor a 30'000,000 EE, en el carril y periodo de diseño. (PT-62 - ICG, 2015, p. 86)

En base a las ecuaciones planteadas por la AASHTO para la determinación de espesores en el paquete estructural del pavimento el Instituto de la Construcción y Gerencia propone espesores para los diferentes tipos de pavimento en función al Tp, dichos espesores son mostrados a continuación:

Figura Nro. 6: Espesores propuestos, Catalogo de estructuras de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente, periodo de diseño 20 años, Tp0 al Tp7.

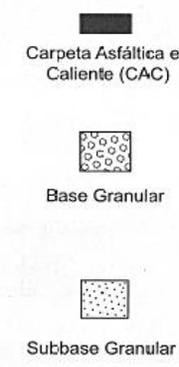
EE		Tp0	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6	Tp7
		75,001-150,000	150,001-300,000	300,001-500,000	500,001-750,000	750,001-1'000,000	1'000,001-1'500,000 (*1)	1'500,001-3'000,000	3'000,001-5'000,000
CBR %	$M_R = 2555 \times CBR^{0.64}$	5 cm 	6 cm 	6 cm 	7 cm 	8 cm 	8 cm 	9 cm 	9 cm
CBR < 6%	$\leq 8,040$ psi (55.4 MPa)	(*) 	(*) 	(*) 	(*) 	(*) 	(*) 	(*) 	(*)
$\geq 6\%$ CBR < 10%	$> 8,040$ psi (55.4 MPa) $\leq 11,150$ psi (76.9 MPa)	5 cm 	6 cm 	6 cm 	7 cm 	8 cm 	8 cm 	9 cm 	9 cm
$\geq 10\%$ CBR < 20%	$> 11,150$ psi (76.9 MPa) $\leq 17,380$ psi (119.8 MPa)	5 cm 	6 cm 	6 cm 	7 cm 	8 cm 	8 cm 	9 cm 	10 cm
$\geq 20\%$ CBR < 30%	$> 17,380$ psi (119.8 MPa) $\leq 22,530$ psi (155.3 MPa)	5 cm 	6 cm 	6 cm 	7 cm 	8 cm 	8 cm 	9 cm 	10 cm
CBR $\geq 30\%$	$> 22,530$ psi (155.3 MPa)	5 cm 	6 cm 	6 cm 	7 cm 	8 cm 	8 cm 	9 cm 	10 cm

Carpeta Asfáltica en Caliente (CAC)
 Base Granular
 Subbase Granular

Fuente: Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección: Suelos y Pavimentos. Lima, Peru. Fondo Editorial ICG. Catálogo de estructuras de pavimento flexible (p. 107).

Figura Nro. 7: Espesores propuestos, Catalogo de estructuras de pavimento flexible con carpeta asfáltica en caliente, periodo de diseño 20 años, Tp8 al Tp14.

EE		Tp8	Tp9	Tp10	Tp11	Tp12	Tp13	Tp14
		5'000,001-7'500,000	7'500,001-10'000,000	10'000,001-12'500,000	12'500,001-15'000,000	15'000,001-20'000,000	20'000,001-25'000,000	25'000,001-30'000,000
CBR %	$M_R = 2555 \times CBR^{0.64}$	11 cm 30 cm	12 cm 35 cm	13 cm 35 cm	14 cm 35 cm	15 cm 35 cm	16 cm 40 cm	17 cm 40 cm
CBR < 6%	$\leq 8,040 \text{ psi}$ (55.4 MPa)	26 cm (*)	21 cm (*)	22 cm (*)	21 cm (*)	22 cm (*)	22 cm (*)	22 cm (*)
$\geq 6\%$ CBR < 10%	$> 8,040 \text{ psi}$ (55.4 MPa) $\leq 11,150 \text{ psi}$ (76.9 MPa)	11 cm 30 cm 26 cm	12 cm 35 cm 21 cm	13 cm 35 cm 22 cm	14 cm 35 cm 21 cm	15 cm 35 cm 22 cm	16 cm 40 cm 22 cm	17 cm 40 cm 22 cm
$\geq 10\%$ CBR < 20%	$> 11,150 \text{ psi}$ (76.9 MPa) $\leq 17,380 \text{ psi}$ (119.8 MPa)	11 cm 30 cm 15 cm	12 cm 30 cm 15 cm	13 cm 30 cm 16 cm	14 cm 30 cm 15 cm	15 cm 30 cm 16 cm	16 cm 30 cm 21 cm	17 cm 30 cm 21 cm
$\geq 20\%$ CBR < 30%	$> 17,380 \text{ psi}$ (119.8 MPa) $\leq 22,530 \text{ psi}$ (155.3 MPa)	11 cm 31 cm	12 cm 31 cm	13 cm 31 cm	14 cm 31 cm	15 cm 31 cm	16 cm 22 cm 15 cm	17 cm 22 cm 15 cm
CBR $\geq 30\%$	$> 22,530 \text{ psi}$ (155.3 MPa)	11 cm 24 cm	12 cm 24 cm	13 cm 24 cm	14 cm 24 cm	15 cm 24 cm	16 cm 27 cm	17 cm 27 cm



Carpeta Asfáltica en Caliente (CAC)
 Base Granular
 Subbase Granular

Fuente: Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección: Suelos y Pavimentos. Lima, Peru. Fondo Editorial ICG. Catálogo de estructuras de pavimento flexible (p. 108).

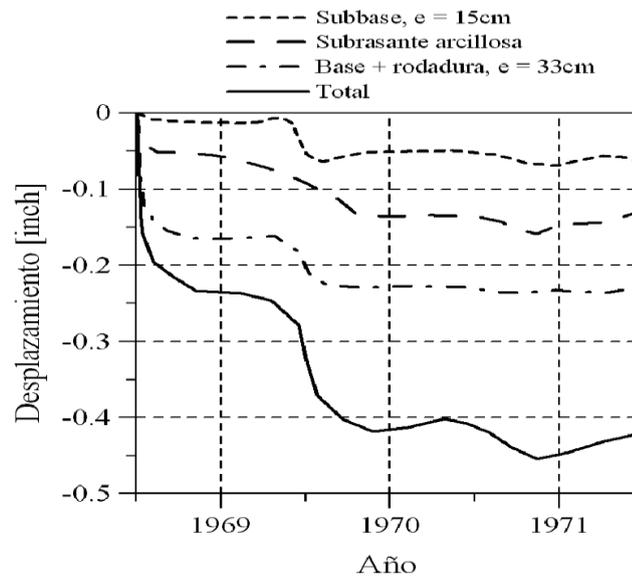
2.2.10. INFLUENCIA DE LA BASE Y SUB BASE EN EL COMPORTAMIENTO DEL PAVIMENTO

Diversos estudios demuestran que las capas conformadas por la base y sub base contribuyen al aun adecuado comportamiento estructural del pavimento frente a la acción de cargas vehiculares. Reyes, (2007) en su investigación denominada "*Metodologías De Diseño De Pavimentos Flexibles; Tendencias, Alcances Y Limitaciones*" Nombro estudios realizados de estructuras de pavimento flexible en donde se ve la influencia de las capas granulares (base y sub base) en el adecuado desempeño de la estructura del pavimento, Reyes expone:

a. Pista de prueba en Alconbury Hill (Inglaterra).

Esta prueba se realizó en una pista circular de 33,6 m de radio y 3,0 m de ancho, donde se emplearon diferentes ejes de carga con pesos similares a los encontrados en un pavimento. Reyes, (2007. p. 45) menciona que durante los cuatro años que duró el ensayo, la deformación permanente se acumuló en cada una de las capas del pavimento ensayado. La mayor parte de la deformación total se generó en la capa asfáltica y en la base granular e incluso se puede observar una gran contribución en la deformación por parte de la sub base. La estructura estaba formada por una capa asfáltica de 10 cm, 23 cm de base, 15 cm de sub base y subrasante arcillosa. (Reyes, 2007, p45)

Figura Nro. 8: Evolución de deformaciones permanentes Transport Research Laboratory (TRL) en Alconbury Hill, Inglaterra.



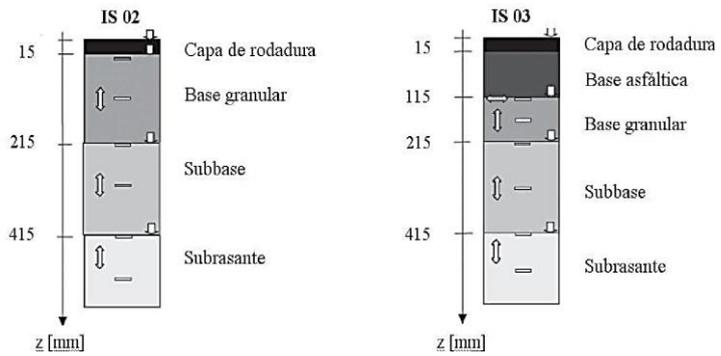
Fuente: Reyes, L. F. Rondon, H. A. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles; tendencias, alcances y limitaciones. (p.45). Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2, p. 45

b. Evaluación estructuras típicas de pavimento flexible, Islandia

Mediante un “Simulador de Vehículo Pesado”, se evaluaron las estructuras de pavimento flexible típicas de Islandia, diseñadas por el método empírico Noruego (denominadas IS 02 e IS 03 mostradas en la Figura 09). Reyes, (2007. p. 44) menciona que:

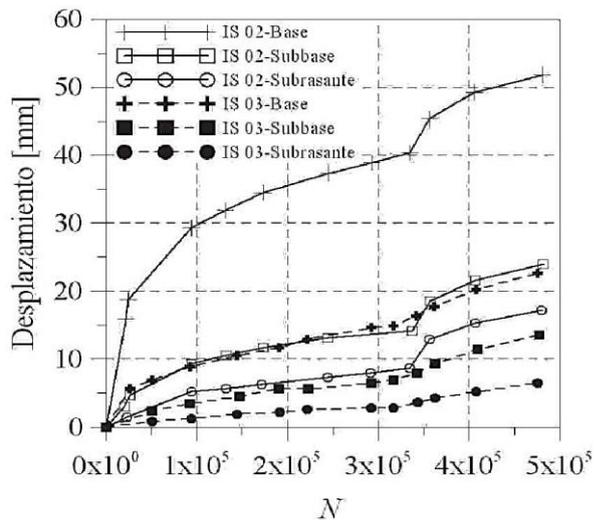
“El material de base y sub base consistió de quarry Holabré (material granular de Islandia) y la subrasante fue una arena estándar de Finlandia. En la Figura 10 se presentan los resultados del estudio y se observa que la capa que experimentó mayor deformación fue la base”.

Figura Nro. 9. Estructuras de pavimento flexible, ensayo HVS.



Fuente: Reyes, F (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones (p.45). Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2, pp. 41-65

Figura Nro. 10: Resultados de deformación, estructuras ensayadas en un HVS.



Fuente: Reyes, F (2007). Metodologías de diseño de pavimentos flexibles: tendencias, alcances y limitaciones (p.44). Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2, pp. 41-65.

De manera similar Reyes, (2007. p. 44), menciona que en secciones de vía monitoreadas en La Florida (USA) se observaron desplazamientos similares a los mencionados, estos estudios fueron realizados por Little y Pidwerbesky en pavimentos flexibles donde observaron desplazamientos superficiales del 30% al 70%

generadas en las capas granulares. (Reyes, 2007, p44)

2.2.11. CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LAS VÍAS URBANAS

- a.** Vías locales: Son aquellas cuya función es la de brindar el acceso a los predios o lotes adyacentes. (SNIP, 2015)

- b.** Vías colectoras: Permiten la integración entre las vías locales, las vías arteriales o las vías auxiliares de las vías expresas. Prestan además servicio a las propiedades adyacentes. El flujo de tránsito es interrumpido frecuentemente por intersecciones semaforizadas en los cruces con vías arteriales y otras vías colectoras. (SNIP, 2015)

- c.** Vías arteriales (avenidas) Permiten la integración entre las vías colectoras con las vías expresas. Son aquéllas que llevan importantes volúmenes de tránsito entre áreas de generación de tránsito y a velocidades medias de circulación. La accesibilidad hacia las áreas adyacentes se realiza a grandes distancias, en las cuales es posible la instalación de pasos a desnivel, intercambios, así como también intersecciones a nivel adecuadamente diseñadas. (SNIP, 2015)

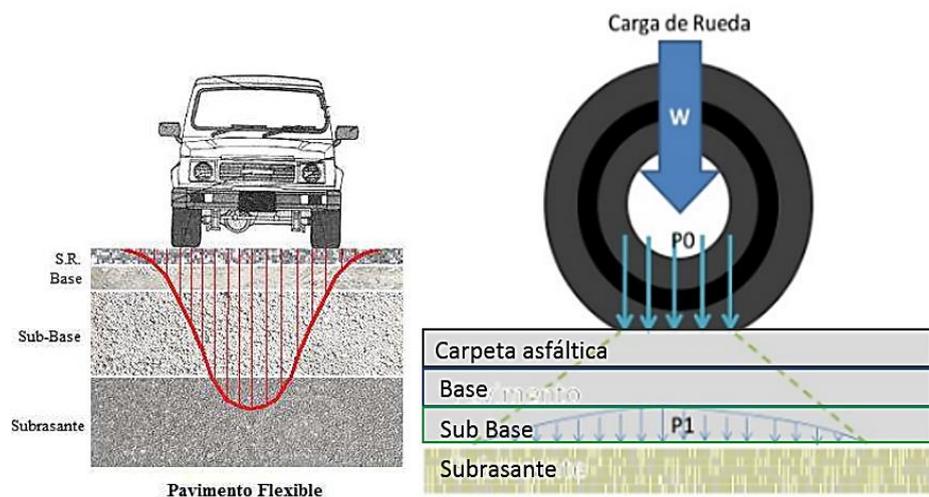
- d.** Vías expresas, La función que cumplen es la de permitir exclusivamente el “paso” de los vehículos, sin interferencias. La accesibilidad se realiza mediante infraestructura especial tales como rampas, puentes, entre otros. Son aquellas vías que soportan importantes volúmenes de vehículos con circulación de alta velocidad, en condiciones de flujo libre. Unen zonas de importante

generación de tránsito, extensas zonas de vivienda y concentraciones comerciales e industriales. (SNIP, 2015)

2.2.12. COMPORTAMIENTO ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

El pavimento al estar sometido a cargas vehiculares, dentro de su estructura presenta esfuerzos, deformaciones y deflexiones, estos deben ser menores a los esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles, para asegurar que el modelo estructural se comporte adecuadamente ante las sollicitaciones de carga durante la vida de servicio.

Figura Nro. 11: Transmisión de esfuerzos, pavimentos flexible



Fuente: García, A. Esfuerzos y deformaciones en pavimentos flexibles.

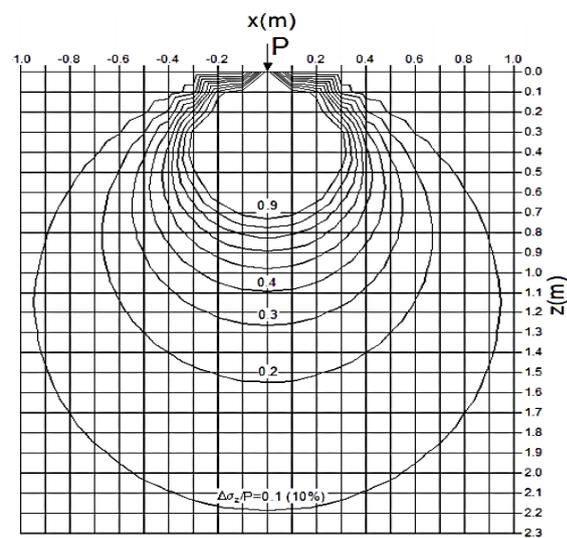
2.2.13. ESTADOS TENSIONALES EN LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO, ESFUERZOS, DEFORMACIONES Y DEFLEXIONES DE SERVICIO.

A. Esfuerzo Vertical, (σ_z)

Cuando una carga es aplicada sobre el suelo, transmite los esfuerzos al suelo. Estos esfuerzos producirán deformaciones, pero

primero el suelo, considerado un medio continuo, disipara estos esfuerzos a medida que se profundiza. Producto de la aplicación de la carga se formara el bulbo de presiones es la zona del suelo donde se producen incrementos de carga vertical, y está conformada por isóbaras que son curvas que tienen en común que unen puntos de un mismo valor de presión.

Figura Nro. 12: Distribución de esfuerzos debido a una carga puntual.



Fuente: Cruz, L. Introducción a la Ingeniería de Cimentaciones. Recuperado de: <https://es.slideshare.net/c13m3r/captulo-5-distribucin-de-esfuerzos-en-el-suelo-debido-a-cargas>

B. Deformación Radial, (ϵ_r)

La deformación radial se presenta en la inter fase de la base con la carpeta asfáltica, esto debido a la acción de cargas vehiculares.

Higuera, (2007.), define:

“La capa asfáltica presenta en la parte inferior tracción de las fibras y en la parte superior de la capa, compresión de las fibras. La magnitud de la deformación de radial se obtiene mediante la modelación de la estructura y análisis de mecánica de

pavimentos.”

Los materiales y las capas asfálticas que constituyen al pavimento sufren el fenómeno denominado fatiga cuando el número de aplicaciones de las cargas pesadas es elevado.

Moll, (2017. p.13) menciona que esto produce una deformación horizontal por tracción en la parte inferior de las capas asfálticas al flexionar la estructura, de exceder el límite crítico se inicia el proceso de fisuración.

C. Deformación Vertical (ϵ_z)

La deformabilidad interesa sobre todo a niveles profundos, pues es relativamente fácil que las capas superiores tengan niveles de deformación tolerables aún para los altos esfuerzos que en ellas actúan. Las deformaciones resilientes o elásticas son de recuperación instantánea y suele denominarse plásticas a aquellas que permanecen en el pavimento después de cesar la carga. Bajo carga móvil la deformación permanente se va acumulando y para ciclos intermedios la deformación permanente para cada ciclo disminuye, hasta que prácticamente desaparece en los ciclos finales.

De acuerdo a los autores Moreno, Rondón y Reyes, (2009), cuando en un material granular se inducen ciclos de carga y descarga, parte de la deformación total que se genera es recuperada instantáneamente, a ésta se le conoce como deformación resiliente

o elástica. Mientras que existe otra deformación que no se recupera y se acumula con cada repetición del ciclo a la cual se le denomina deformación permanente o plástica.

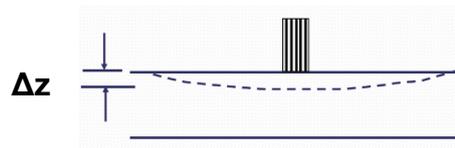
Moll, (2017, p.13), cuando la capacidad de deformación-recuperación de los materiales que conforman la estructura de pavimento provocada por los ciclos de carga es superada más allá del valor límite establecido, generando deformaciones permanentes (ahuellamiento), se pueden presentar a nivel de subrasante, capas de base, sub base granular y capas asfálticas.

D. Deflexiones, (Δz)

El desplazamiento vertical experimentado en la superficie de una estructura de pavimento asfáltico como respuesta a la aplicación de una carga externa se conoce como deflexión, la cual se produce en magnitudes muy pequeñas (centésimas de milímetro).

Moll, (2017, p.14), menciona que cuando una carga se aplica sobre la superficie, todas las capas se deflectan, desarrollándose esfuerzos y deformaciones en cada una de ellas.

Figura Nro. 13: Representación deflexión, estructura del pavimento.



Fuente: García, A. Esfuerzos y deformaciones en pavimentos flexibles. (p.12)

2.2.14. CRITERIOS FUNDAMENTALES PARA EL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Higurera, (2010, p.50), menciona que en la etapa de diseño se debe de considerar diversos criterios con la finalidad de que el pavimento flexible posea un adecuado desempeño estructural, los criterios considerados sirven para: Controlar la fatiga de la capa asfáltica, control de deformación o ahullamiento y control de la deflexión.

A. Control de fatiga

Con la finalidad de controlar la fatiga de la capa bituminosa ante las solicitaciones de las cargas vehiculares, lo que a la larga podrían producir daños estructurales, la deformación radial que actúa en la capa bituminosa (ϵ_r) debe de ser menor a la deformación radial admisible ($\epsilon_{r adm}$). (Higurera, 2010, p.50)

B. Control de deformación o ahullamiento

La deformación vertical de compresión (ϵ_z) que se encuentra presente en la subrasante deberá de ser menor a la deformación vertical admisible ($\epsilon_{z adm}$). Esto con la finalidad de controlar el ahullamiento y la deformación de la estructura del pavimento, lo que generaría daños estructurales en el pavimento. (Higurera, 2010, p.50)

C. Control de deflexión

Con la finalidad de controlar las deflexiones excesivas en la estructura, la deflexión vertical (Δ_z) presente en la superficie del pavimento deberá de ser menor a la deflexión admisible ($\Delta_{z adm}$). (Higurera, 2010, p.50)

2.2.15. ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO PAVIMENTO FLEXIBLE

Las diversas metodologías de diseño emplean nociones usadas en otras áreas de la ingeniería que consideran en su análisis las propiedades de los materiales que constituirán al pavimento, gracias a ello se pueden obtener los esfuerzos, deformaciones y deflexiones producidas por las cargas a las que está sometida la estructura.

Los modelos de análisis para el diseño de un pavimento se plantean por métodos racionales, los cuales iniciaron su análisis con modelos “simples” como es el caso de un sistema de modelos bicapas que posteriormente se fue sofisticando en los análisis de modelos tricapas y multicapa. El análisis de pavimento parten de considerar al modelo como un semi de espacio homogéneo; el cual tiene un área y profundidad infinita con una carpeta delgada en la superficie en la cual se aplican las cargas.

Boussinesq en 1885 planteo un primer análisis para determinar la distribución de esfuerzos en un pavimento, este análisis centra su estudio en la distribución de esfuerzos de una masa de suelo a cualquier profundidad; el análisis considera la aplicación de una carga concentrada la cual se aplica en un semi espacio lineal, elástico, isótropo y homogéneo; los esfuerzos, deformaciones y deflexiones debidos a la carga concentrada pueden ser extrapolados para obtener aquellas debidas a una área circular cargada. La solución planteada por Boussinesq fue por mucho tiempo la única disponible, hasta que en el año de 1945 Donald M. Burmister propuso

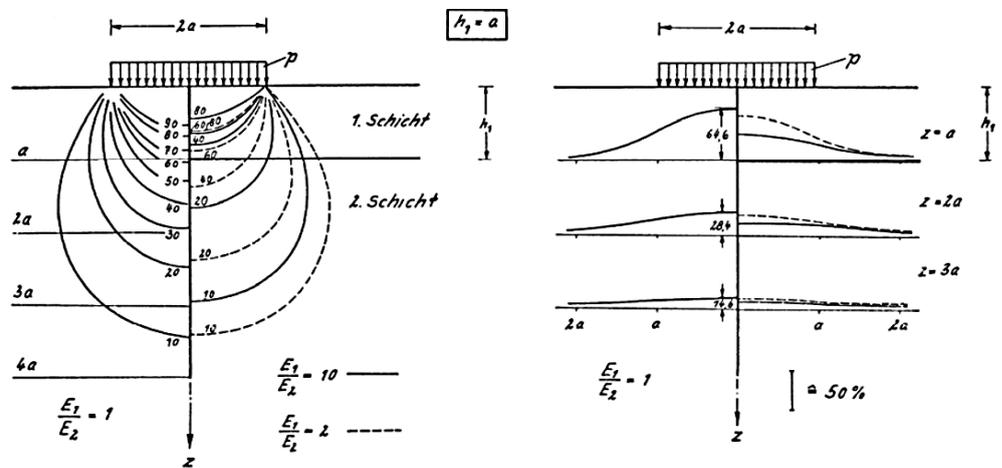
una teoría que se podía aplicar a estructuras de pavimentos, la teoría se basa en el modelo de Boussinesq, la diferenciación es que esta considera en su análisis los estratos y las propiedades mecánicas del suelo, esto con la finalidad de calcular los esfuerzos cualquier profundidad. Desde el punto de vista del estudio de pavimentos, el modelo de Burmister puede ser usado para determinar los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en la subrasante si la relación de módulos del pavimento y la subrasante es cercana a la unidad, si no es así, la modelación es más compleja. Analíticamente el análisis de Burmister es un procedimiento más complejo que los basados del modelo de Boussinesq; el modelo de Burmister introduce transformadas de Fourier que requieren funciones de Bessel para su solución y que sin la ayuda de un programa de computador no se pueden modelar estructuras de más de dos capas. Se planteó soluciones para el análisis de sistemas multicapa, estas fueron propuestas por Westergaard, Palmer y Barber, Odemark entre otros; estos modelos analizan el funcionamiento del sistema de un pavimento multicapa, donde la presión ejercida por una rueda es distribuida por la estructura del pavimento, repartiendo la carga para llevarla lo más reducida posible a la subrasante; el análisis considera en su solución la determinación del esfuerzo disipado de la carga a una profundidad z .

A. MODELO DE BURMISTER

Burmister fue el primero que proporciono soluciones de esfuerzos verticales en un sistema de dos capas.

Como la Figura Nro. 14 muestra el efecto que se produce en una capa superior rígida la cual distribuye los esfuerzos verticales en un sistema de dos capas.

Figura Nro. 14: Distribución de esfuerzos verticales en forma de bulbo de presiones, pavimento flexible.

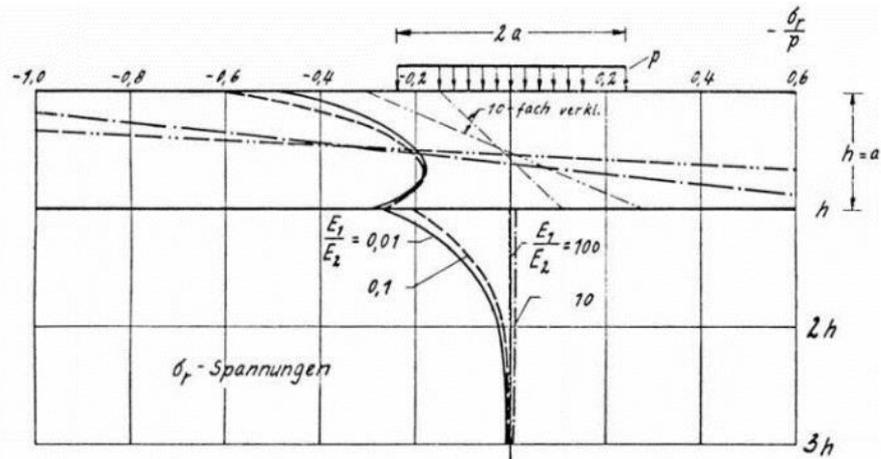


Tomada de: Augusto Garcia. Esfuerzos deformaciones en pavimentos flexibles.

En primer lugar se observa la distribución del esfuerzo vertical en forma de bulbo de presiones. La grafica nos muestra que la magnitud del esfuerzos vertical es bastante influenciada por la rigidez de la capa superior. A partir de este análisis se concluye que si el esfuerzo de tracción horizontal en la parte inferior de la capa superior es demasiado alta, esta será la causante del agrietamiento de la capa superior. En la Figura Nro. 15 se muestra la distribución de los esfuerzos verticales horizontal y vertical desarrollados en un sistema de dos capas, esto bajo el centro de

la carga en relación de E_1 / E_2 y para espesores de $h = a$. teniendo en cuenta que la relación de Poisson de 0.25 para ambas capas.

Figura Nro. 15: Distribución de esfuerzos tangenciales y verticales en un sistema de dos capas. Esfuerzos tangenciales en un sistema bicapa, de módulos de elasticidad diferentes. Planteado por Burmister.



Tomada de: Augusto Garcia. Esfuerzos deformaciones en pavimentos flexibles (p.17).

El modelo de Burmister parte de la siguiente hipótesis:

- La interfase entre capas pueden escogerse como pegadas o despegadas, y se pueden analizar tanto unas como otras.
- Todas las capas que conforman el modelo se tratan como sólidos elásticos (evitándose así la teoría de placas).
- Se puede aplicar el caso de cargas múltiples y repetidas ejercidas por los diferentes tipos de ejes (simple, tandem, y trídem)

B. Estudios realizados en sistema multicapa

B.1. Método de los Espesores Equivalentes de Odemark

Nils Odemark en 1949 elaboro un método para la estimación de espesores equivalentes, el modelo simplificado de Odemark

permite calcular la respuesta tenso deformacional del pavimento frente a la acción de cargas en un sistema multicapa elástico. El método planteado por Odemark transforma a un sistema multicapa a sistema con un semi espacio homogéneo y lineal equivalente, con un módulo elástico único. (Bardazano, 2014)

De este modo, si varían el espesor h , el módulo elástico E o el coeficiente de Poisson de una capa, de forma que su rigidez global se mantenga constante, las esfuerzos verticales y deformaciones bajo dicha capa permanecerán aproximadamente invariables. A efectos de cálculo de los esfuerzos verticales y deformaciones en la segunda capa, si se cumple que el $h_{e,1}$: 'espesor equivalente' de la capa 1 respecto a la capa 2. (Bardazano, 2014)

Ecuación Nro. 4: Correlación, espesores equivalentes Odemark

$$\frac{h_1^3 E_1}{1 - \nu_1^2} = \frac{h_{e,1}^3 E_2}{1 - \nu_2^2}$$

Tomado de: Bardasano G. (2014) Ingeniero de caminos Disponible en: <http://paveing.blogspot.pe/2014/11/metodo-de-los-espesores-equivalentes-Odemark.html>

Donde:

h_1 : Espesor de capa (m.).

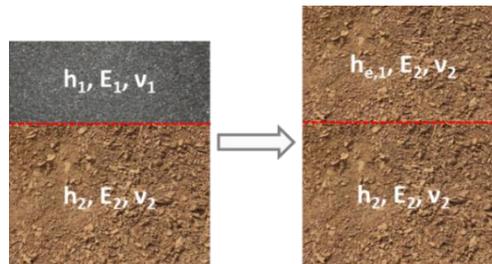
E_1 : Modulo de elasticidad de la capa.

ν_1^2 : Coeficiente de Poisson.

El sistema equivalente de la parte derecha de la Figura Nro. 16, es un semi espacio infinito, en el sistema equivalente son

aplicables las ecuaciones planteadas por Boussinesq y ecuaciones derivadas a partir de ellas para la estimación de cargas distribuidas (ecuaciones de Foster y Ahlvin).

Figura Nro. 16: Representación de la transformación de un sistema multicapa a su equivalente monocapa.



Fuente: Bardasano G. (2014) Ingeniero de caminos Disponible en: <http://paveing.blogspot.pe/2014/11/metodo-de-los-espesores-equivalentes-Odemark.html>

Esta transformación se utiliza únicamente para calcular esfuerzos verticales y deformaciones de desplazamientos por debajo de la interfaz.

Ecuación Nro. 5: Ecuación de correlación, espesores equivalentes Odemark

$$h_{e,1} = h_1 \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2} \times \frac{1 - \nu_2^2}{1 - \nu_1^2}}$$

Bardazano, (2014) menciona:

“En el método para estimar espesores equivalentes se emplean factores de corrección, se recomienda emplear un factor de corrección de 0,8 para todas las capas exceptuando la primera interfaz (transformación de la capa superior en una equivalente respecto a la inmediatamente inferior). En sistemas bicapa se emplea un factor de 0.9 y sistemas multicapa el factor de corrección es de 1.0.”

La fórmula generalizada de Odemark para la aplicación de un sistema multicapa, el cual es de $n-1$ capas por encima de la capa n , es la siguiente:

Ecuación Nro. 6: Ecuación para espesores equivalentes Odemark, simplificados

$$h_e = f \cdot \sum_{i=1}^{n-1} h_i \cdot \sqrt[3]{\frac{E_1}{E_2}}$$

Fuente: Hidalgo, F. (2007). *Definición moderna de los parámetros para el diseño de pavimentos* (Tesis de Pregrado) Escuela Politécnica del Ejército. Ecuador.

Donde:

h_1 : Espesor de capa n .

h_e : Espesor equivalente

E_1 : Modulo de elasticidad de la primera capa.

E_2 : Modulo de elasticidad de la segunda capa.

f : Factor de corrección.

B.2. Estimación del Módulo de Elasticidad Equivalente, Odemark, Palmer-Barber

La fórmula planteada por Odemark, Palmer-Barber uniformiza en un solo módulo de elasticidad los diferentes módulos de elasticidad de cada capa del pavimento. (Camacho, 2001, p.172).

Ecuación Nro. 7: Módulo de Elasticidad Equivalente, Odemark, Palmer-Barber

$$\hat{E} = E_1 \left[\frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3$$

Donde:

- \hat{E} : Modulo de elasticidad Equivalente
- E_1 : Modulo de elasticidad de la primera capa
- E_{n-1} : Modulo de elasticidad de la penúltima capa
- h_1 : Espesor de la primera
- h_{n-1} : Espesor de la penúltima capa

Esta estimación de un módulo de Elasticidad equivalente es de gran utilidad para la determinación de deflexiones en la estructura del pavimento. Con ello se puede determinar la deflexión en el centro de carga del pavimento. Camacho, 2001, p.172).

Ecuación Nro. 8: Deflexión estimada con la Elasticidad Equivalente

$$w_o = \frac{2qa(1 - \nu^2)}{E_s} \left[\frac{1 - \frac{E_n}{\hat{E}}}{\left[1 + \left(\frac{h_1 + \dots + h_{n-1}}{a} \right)^2 \left(\frac{\hat{E}}{E_n} \right)^{\frac{2}{3}} \right]} + \frac{E_n}{\hat{E}} \right]$$

Donde:

- W : Deflexión (mm)
- z : Profundidad medida desde la superficie donde se requiere obtener la presión vertical (σ_z)
- r : Radio de la superficie de contacto de la llanta con el pavimento
- q : Carga de contacto (kg/cm2)
- z : Profundidad cm.
- a : área de contacto cm2

2.2.16. ECUACIONES PARA LA DETERMINACIÓN DE ESFUERZOS, DEFORMACIONES Y DEFLEXIONES DE SERVICIO EN EL INTERIOR DEL PAVIMENTO FLEXIBLE

Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones en la estructura del pavimento se pueden determinar en cualquier punto del modelo. Los esfuerzos, deformaciones y deflexiones actuantes en una estructura de pavimentos se denominan de servicio o críticos y deben de ser menores a los esfuerzos, deformaciones y deflexiones admisibles, a continuación se nombran las ecuaciones planteadas para la evaluación de modelos estructurales.

A. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS VERTICALES EN EL INTERIOR DEL PAVIMENTO

El modelo planteado por Boussinesq debe de cumplir una serie de requisitos, en primer lugar el sistema debe de ser una superficie con un semi espacio infinitamente grande; considerando que el punto en el que se desea hallar los esfuerzos se encuentra en un medio homogéneo, elástico e isotrópico. (Yang, 2004, p.50).

Ecuación Nro. 9: Esfuerzos verticales, Joseph Boussinesq

$$\sigma_c = \sigma_z = q * \left[1 - \frac{z^3}{(r^2 + z^2)^{1.5}} \right]$$

Donde:

q : Presión de contacto (kg/cm²).

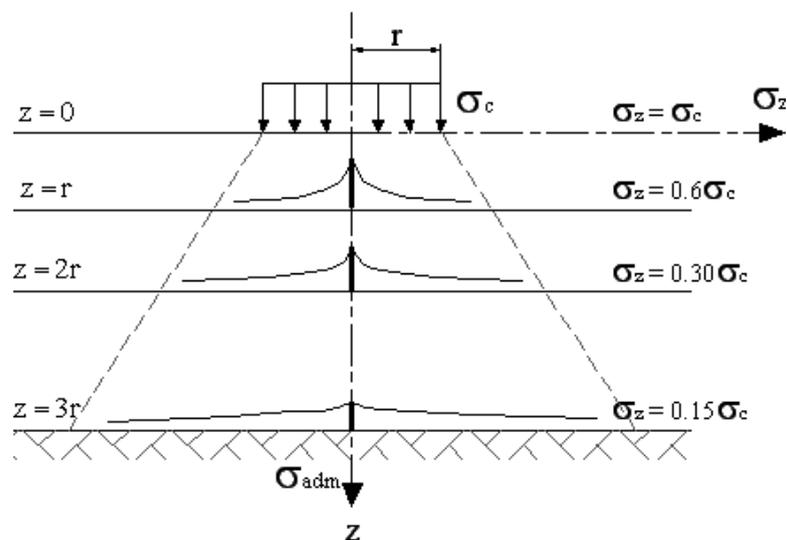
z : Profundidad medida desde la superficie donde se requiere obtener la presión vertical (σ_z).

r : Radio de la superficie de contacto de la llanta con el pavimento.

Según la Ecuación Nro. 9, el esfuerzo normal σ_z es independiente de las características del suelo.

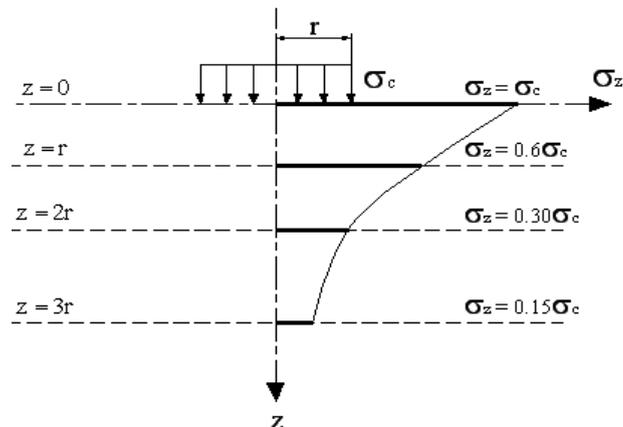
Una de las características de las capas de los pavimentos flexibles es que los módulos de elasticidad de sus capas constituyentes tienen un valor menor a medida que se localizan a mayor profundidad. Por este motivo el efecto causado por la presión de un neumático sobre el pavimento disminuirá conforme aumente la altura (h) del mismo.

Figura Nro. 17: Distribución de esfuerzos verticales medio semi infinito (Boussinesq)



Fuente: Hidalgo, F. (2007) Definición moderna de los parámetros para el diseño de pavimentos. (p.49).

Figura Nro. 18: Distribución de presiones medio semi infinito (Boussinesq)



Fuente: Hidalgo, F. (2007) Definición moderna de los parámetros para el diseño de pavimentos. (p.50).

Juarez y Rico, (2011, p. 20) mencionan que la solución planteada por Boussinesq considera que el punto en el que se desea hallar los esfuerzos se encuentra en un medio homogéneo, elástico e isotrópico.

- a) Semiespacio infinitamente grande. La masa de suelo está limitada en uno de sus lados mientras que se extiende infinitamente en las otras direcciones. (Juarez y Rico, 2011)
- b) Material homogéneo. Un material se considera homogéneo cuando presenta las mismas propiedades a lo largo de todos sus ejes o direcciones. (Juarez y Rico, 2011)
- c) Material isotrópico. Significa que tanto el módulo de elasticidad, módulo cortante y el coeficiente de Poisson son los mismos en todas las direcciones. (Juarez y Rico, 2011)

B. DISTRIBUCIÓN DE ESFUERZOS RADIAL EN EL INTERIOR DEL PAVIMENTO

Estimación del esfuerzo radial tangencial en el interior del pavimento es determinada con la siguiente ecuación.

Ecuación Nro. 10: Esfuerzos radiales

$$\sigma_r = \frac{q}{2} \left[1 + 2r - \frac{2(1 + \nu)z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right]$$

Donde:

- q : Presión de contacto kg/cm²
- σ_r : Profundidad medida desde la superficie donde se requiere obtener la presión vertical (σ_z)
- r : Radio de la superficie de contacto de la llanta con el pavimento
- ν : Coeficiente de Poisson
- z : Profundidad expresado en cm.
- a : Área de contacto

C. ESTIMACIÓN DE DEFORMACIONES VERTICAL EN EL INTERIOR DEL PAVIMENTO

Estimación de deformación vertical bajo el centro de la placa. Para la determinación de las deformaciones que se producen por una carga puntual en el interior del sistema planteado se emplea las ecuaciones mencionadas por Huang, (2004, p.50).

Ecuación Nro. 11: Deformaciones vertical

$$\epsilon_z = \frac{(1 + \nu)q}{E} \left[1 - 2\nu + \frac{2\nu z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} - \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right]$$

Donde:

- ϵ_z : Deformación vertical
- ν : Coeficiente de Poisson

- E : Modulo de elasticidad de la capa
- q : Presión de contacto kg/cm²
- z : Profundidad expresado en cm.
- a : Área de contacto cm²

O también la ecuación propuesta por (Higuera, 2010, p.4).

Ecuación Nro. 12: Deformaciones vertical, simplificada

$$\epsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$$

Donde:

- ϵ_z : Deformación vertical
- E : Modulo de elasticidad de la capa
- σ_z : Esfuerzo vertical kg/cm²
- σ_x : Esfuerzo radial kg/cm²
- σ_y : Esfuerzo tangencial kg/cm²

D. ESTIMACIÓN DEFORMACIÓN RADIAL TANGENCIAL BAJO EL CENTRO DE LA PLACA

Para la determinación de las deformaciones radiales tangenciales que se producen por una carga en el interior del sistema se emplea las ecuaciones mencionadas por Huang, (2004, p.50).

Ecuación Nro. 13: Deformación radial tangencial

$$\epsilon_r = \frac{(1 + \nu)qa}{2E} \left[1 - 2\nu - \frac{2(1 - \nu)z}{(a^2 + z^2)^{0.5}} + \frac{z^3}{(a^2 + z^2)^{1.5}} \right]$$

Donde:

- ϵ_r : Deformación radial
- ν : Coeficiente de Poisson
- E : Modulo de elasticidad de la capa
- q : Presión de contacto kg/cm²

z : Profundidad expresado en cm.

a : Área de contacto cm²

O también la ecuación nombrada por Higuera (2010. p.4).para el análisis de los estados tensionales en la estructura del pavimento.

Ecuación Nro. 14: Deformación Radial Tangencial, Simplificada

$$\epsilon_r = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$$

Donde:

ϵ_z : Deformación vertical

E : Modulo de elasticidad de la capa

σ_z : Esfuerzo vertical kg/cm²

σ_x : Esfuerzo radial kg/cm²

σ_y : Esfuerzo tangencial kg/cm²

E. ESTIMACIÓN DE DEFLEXIONES EN EL INTERIOR DEL PAVIMENTO

Para la determinación de deflexiones en la estructura del pavimento se empleó las ecuaciones planteadas por Odemark, Palmer-Barber. Esto para determinar el módulo de elasticidad equivalente en un sistema multicapa en su totalidad. Mediante la ecuación Nro. 07 se estima el Modulo de elasticidad equivalente para ser reemplazado en la ecuación Nro. 08 para la determinación de deflexiones en las diversas inter fases de la estructura del pavimento. Camacho, (2008, p.172).

$$\hat{E} = E_1 \left[\frac{h_1 + h_2 \sqrt[3]{\frac{E_2}{E_1}} + h_3 \sqrt[3]{\frac{E_3}{E_1}} + \dots + h_{n-1} \sqrt[3]{\frac{E_{n-1}}{E_1}}}{\sum_{i=1}^{n-1} h_i} \right]^3 \quad \text{Ecuación Nro. 07}$$

Donde:

- \hat{E} : Modulo de elasticidad Equivalente
- E_1 : Modulo de elasticidad de la primera capa
- E_{n-1} : Modulo de elasticidad de la penúltima capa
- h_1 : Espesor de la primera
- h_{n-1} : Espesor de la penúltima capa

$$w_o = \frac{2qa(1 - \nu^2)}{E_s} \left[\frac{1 - \frac{E_n}{\hat{E}}}{\left[1 + \left(\frac{h_1 + \dots + h_{n-1}}{a} \right)^2 \left(\frac{\hat{E}}{E_n} \right)^{\frac{2}{3}} \right]} + \frac{E_n}{\hat{E}} \right] \quad \text{Ecuación Nro. 08}$$

Donde:

- w : Deflexión (mm)
- z : Profundidad medida desde la superficie donde se requiere obtener la presión vertical (σ_z)
- r : Radio de la superficie de contacto de la llanta con el pavimento
- q : Carga de contacto (kg/cm²)
- z : Profundidad cm.
- a : área de contacto cm²

2.2.17. ESTIMACIÓN DE ESFUERZOS Y DEFORMACIONES Y DEFLEXIONES ADMISIBLES

A. Criterio de esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, $\sigma_{z adm}$

Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante, $\sigma_{z adm}$ determina de acuerdo a los criterios de Dormon y

Kerhoven y la CRR de Bélgica, Higuera, (2011, p.52), menciona las ecuaciones para determinar dicho esfuerzo las cuales son las siguientes:

A.1. Criterio de Dormon y Kerhoven.

El esfuerzo vertical admisible sobre la subrasante se determina por medio de la siguiente expresión:

Ecuación Nro. 15: Esfuerzo vertical admisible, Criterio de Dormon y Kerhoven

$$\sigma_{z adm} = \frac{0.007 \times E_s}{1 + 0.7 \times \log N}$$

Donde:

- $\sigma_{z adm}$: Esfuerzo vertical admisible de compresión sobre la subrasante (kg/cm²)
- E_s : Modulo Resiliente de la Subrasante (kg/cm²)
- N : Transito de diseño expresado en ejes equivalentes de 80 KN en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

A.2. Criterio de la CRR de Bélgica

El esfuerzo admisible de compresión sobre la subrasante se determina por medio de la siguiente expresión:

Ecuación Nro. 16: Esfuerzo vertical admisible, Criterio de la CRR de Bélgica

$$\sigma_{z adm} = \frac{0.9607 \times CBR^{1.2}}{N^{0.229}}$$

Donde:

- $\sigma_{z adm}$: Deflexión vertical admisible (mm).
- N : Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 80 KN en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

B. Criterio de la Shell para la determinación de la deformación vertical admisible de compresión en la subrasante, $\epsilon_{z adm}$

Higuera, (2011, p.52) menciona que el criterio de la deformación admisible de compresión sobre la subrasante está en función del nivel de su confiabilidad. Sus expresiones de cálculo para diferentes niveles de confianza son:

Ecuación Nro. 17: Deformación Vertical Admisible, Criterio de la Shell. Nivel de confianza del 50%

$$\epsilon_{z adm} = 2.80 \times 10^{-2} \times N^{-0.25}$$

Ecuación Nro. 18: Deformación Vertical Admisible, Criterio de la Shell. Nivel de confianza del 85%

$$\epsilon_{z adm} = 2.10 \times 10^{-2} \times N^{-0.25}$$

Ecuación Nro. 19: Deformación Vertical Admisible, Criterio de la Shell. Nivel de confianza de confianza del 95%

$$\epsilon_{z adm} = 1.80 \times 10^{-2} \times N^{-0.25}$$

Donde:

$\epsilon_{z adm}$: Deformación vertical admisible en la subrasante.

N : Tránsito de diseño expresado en ejes equivalentes de 80 kN de carril de diseño durante el periodo de diseño.

C. Criterio de la Shell para la determinación de la deformación radial de tracción admisible en la base de la capa asfáltica,

$\epsilon_{r adm}$

La ley de fatiga de la Shell esta expresada:

Ecuación Nro. 20: Criterio de la Shell, deformación radial de tracción admisible

$$\epsilon_{r adm} = (0.856V_b + 1.08)E_1^{-0.36} \left(\frac{N}{K}\right)^{-0.20}$$

Donde:

- $\Delta_{r adm}$: Deflexión de tracción admisible de la capa asfáltica.
- V_b : Porcentaje del volumen de asfalto de la mezcla.
- E_1 : Modulo dinámico de la mezcla (N/m²)
- N : Transito de diseño expresado en ejes equivalentes de 80 KN en el carril de diseño durante el periodo de diseño.
- K : Coeficiente de Calage ($k_1 * k_2 * k_3$)

El modelo de fátiga propuesto por la Shell incorpora el coeficiente de Calage, el cual relaciona el número de aplicaciones de carga de diseño y el número de aplicaciones de carga de un ensayo dinámico de laboratorio. El factor considera principalmente variaciones laterales de las cargas de tránsito, condiciones de temperatura de la mezcla y diferentes estados de tensiones.

Tabla Nro. 11: Coeficiente de Calage

Auto reparación de fisuras pequeñas	K1	Mezclas abiertas con bajos porcentajes de asfalto	Mezclas densas con altos porcentajes de asfalto
		2.00	10.00
Distribución lateral de cargas	K2	2.50	
Diferentes temperaturas de trabajo de la mezcla por día por año	K3	Espesores pequeños temperaturas bajas	Espesores altos Temperaturas altas
		1.00	0.33

Fuente: UNIVERSIDAD DE CAUCA, Curso de especialización de vías terrestres. (1985). Popayán.

D. Deflexión vertical admisible en la superficie, ($\Delta_{z adm}$)

Las medidas de deformación son un criterio de deformabilidad permite evaluar el estado y la capacidad estructural de un pavimento con el número de aplicaciones de carga hasta que este alcance el estado de falla.

La deflexión admisible de la estructura de referencia se calcula por medio del criterio de Yang H. Huang, de la siguiente manera:

Ecuación Nro. 21: Deflexión vertical admisible en la superficie, Yang H. Huang

$$\Delta_{z adm} = 26.32202xN^{-0.2438}$$

Donde:

$\Delta_{z adm}$: Deflexión vertical admisible (mm).

N : Transito de diseño expresado en ejes equivalentes de 80 KN en el carril de diseño durante el periodo de diseño.

2.3. HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN

2.3.1. HIPÓTESIS GENERAL

Con el empleo del material de la cantera Sicaya se podrá diseñar mejores modelos de pavimentos flexibles en subrasante de CBR menor al 10% empleando el catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.

2.3.2. HIPÓTESIS ESPECÍFICOS

- a. El material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya cumple con los requisitos de calidad para ser empleado en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.
- b. El material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya posee un adecuado desempeño estructural en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor

al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.

2.4. MARCO CONCEPTUAL

- **Capas granulares**, capas conformadas por material extraído de canteras que reúnen determinadas características físicas, químicas y mecánicas solicitados por la norma CE.010, las cuales conformaran la base y la sub base en la estructura del pavimento.
- **Carga vehicular**, carga del peso del vehículo transmitida a través del área de contacto de las ruedas a la estructura del pavimento.
- **Carpeta asfáltica**, capa externa del pavimento conformada por material pétreo de una granulometría específica y material bituminoso.
- **Deflexión**, variación de espesor que se presenta en un estado inicial a uno final debido a la carga aplicada.
- **Deformación**, variación de espesor que se presenta espesor debido a la carga del vehículo que se recupera a un estado inicial
- **Desempeño estructural**, comportamiento que presenta la estructura del pavimento cuando esta recibe cargas vehiculares.
- **Esfuerzo vertical**, carga que se transmite en el interior de la estructura en el eje Y, producto de la carga vehicular.
- **Estados tensionales**, efectos que se producen en el interior del pavimento debido a la aplicación de cargas de tránsito, estos son esfuerzos verticales, deformaciones verticales, deformaciones radiales y deflexiones.
- **Material para base y sub base**, material extraído de canteras que reúne características específicas para su empleo, estas características son

nombradas en la norma NE. 010 Pavimentos Urbanos del Reglamento Nacional de Edificaciones

- **Método AASHTO 93**, método de diseño empírico empleado para determinar espesores de pavimento flexible, este método se obtuvo a partir de la observación de las pistas de prueba
- **Método racional**, método empleado para el análisis y evaluación de estructuras de pavimento el cual emplea diversas ecuaciones planteadas a partir de conversiones de un sistema multicapa a un sistema monocapa, planteadas a partir de la hipótesis de Boussinesq que permiten determinar los esfuerzos, deformaciones, deflexiones que se producen en el modelo analizado
- **Modelo de pavimento**, estructura del pavimento diseñada para un determinado tipo de tráfico y una subrasante específica, estos espesores son determinados a partir del método AASHTO 1993, propuesto en el manual PT- 62 del ICG.
- **Pavimento**, estructura que tiene como función disminuir los diversos estados tensionales que produce la carga vehicular, la cual debe de poseer un adecuado desempeño estructural a lo largo de su tiempo de servicio, ofreciendo una adecuada transitabilidad.
- **Requerimientos de calidad**, características que el material que conformara la base y la sub base deben de cumplir, estos son detallados en la norma CE.010 Pavimentos urbanos del RNE
- **Subrasante**, suelo natural sobre la cual se conformaran las capas del pavimento.

2.5. SISTEMA DE VARIABLES

a) VARIABLE INDEPENDIENTE

Y = MATERIAL PARA BASE Y SUB BASE

- Estudios de mecánica de suelos.
- Estados tensionales

b) VARIABLE DEPENDIENTE

**X = PAVIMENTOS FLEXIBLES DE SUBRASANTE DE CBR MENOR
AL 10%**

- Requisitos de calidad
- Desempeño estructural

c) VARIABLE INTERVINIENTE

Z = CATALOGO DE ESTRUCTURAS PAVIMENTO FLEXIBLE.

2.6. OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

Tabla Nro. 12: VARIABLE INDEPENDIENTE (Y): Material para base y sub base

DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES		INDICADORES
Capa de agregados pétreos, convenientemente graduados y compactados, que cumplen las Especificaciones Técnicas Generales y Especiales del proyecto, colocadas sobre la subrasante	Define a las capas que se encuentran entre la carpeta asfáltica y la subrasante, que contribuyen en la disminución los estados tensionales que las cargas vehiculares generan en la estructura del pavimento, esta contribución depende de la calidad del material y del espesor de estas capas	- Estudios de mecánica de suelos. - Estados tensionales	- Ensayos solicitados para evaluar la calidad del material para base y sub base Norma CE.010, del RNE. - Esfuerzo vertical, deformaciones y deflexiones	
TÉCNICAS E INSTRUMENTO	PROCEDIMIENTOS	NATURALEZA	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDIR
TÉCNICAS: Revisión documental, Observación indirecta INSTRUMENTOS:	Las técnicas e instrumentos de la investigación aplicados en la unidad de análisis se elaboraron en función al análisis comparativo del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya	Variable cuantitativa cualitativa	Ordinal	Directa

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla Nro. 13: VARIABLE DEPENDIENTE (X): Pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10%

DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES		INDICADORES
El pavimento flexible es una estructura compuesta por capas granulares (sub base y base) y como capa de rodadura una carpeta constituida con materiales bituminosos, agregados las cuales se apoyan sobre una subrasante.	El concepto define a los diversos modelos de pavimento flexible propuestos en el catálogo de estructuras del manual PT-62 del ICG, diseñados para subrasante del tipo regular. El cual conforma desde el TP0 a un Tp14.	- Requisitos de calidad. - Desempeño estructural.	de	- Cumplimiento de los requerimientos de calidad material para base y sub base Norma CE.010, del RNE. - Comportamiento de la estructura dentro de lo recomendado por los criterios: CRR de Bélgica, Criterio Shell y Criterio de Huang.
TÉCNICAS E INSTRUMENTO	PROCEDIMIENTOS	NATURALEZA	ESCALA DE MEDICIÓN	FORMA DE MEDIR
TÉCNICAS: Revisión documental, Observación indirecta INSTRUMENTOS:	Las técnicas e instrumentos de la investigación aplicados en la unidad de análisis se elaboraron en función al análisis comparativo del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya	Variable cuantitativa cualitativa	Ordinal	Directa

Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. TIPO DE INVESTIGACIÓN

La presente investigación es del tipo aplicada.

3.2. NIVEL DE INVESTIGACIÓN

El nivel de investigación es descriptivo, exploratorio y explicativo.

3.3. MÉTODO DE INVESTIGACIÓN

El método de investigación es inductivo, deductivo, analítico, sintético, y sistemático.

3.4. DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

En el diseño de investigación tipo experimental, se manipulan estímulos (variable independiente) para analizar su efecto sobre la variable dependiente, es decir, se provoca algún fenómeno para observar e interpretar su resultado. Se hace un experimento.

Un experimento, es una situación de control en la cual participan 2 grupos de comparación: uno experimental que recibe el estímulo y otro de control que no. A ambos grupos se aplica la medición sobre la variable dependiente para después realizar una comparación.

Los tipos de experimento de acuerdo con la tipología de Campbell y Stanley (1966), mencionado en (Sampieri, 2010), se identifican 3 tipos: pre experimento, experimento puro y cuasi experimento.

Se realizó los estudios de los materiales de las canteras en un laboratorio para determinar sus características físicas, químicas y mecánicas según lo requerido por la norma CE.010 del Reglamento Nacional de Edificaciones para su posterior evaluación.

3.5. TECNICAS DE RECOLECCION DE LA INFORMACION

3.6.2. Instrumentos de recoleccion de datos

Los instrumentos utilizados para recoleccion de informacion son: observacion(personal-directa), expedientes, libros, reglamentos e internet. **La observación Directa.**- Esta técnica nos permitió observar la calidad de via de acceso hacia la poblacion de la Ciudad de Concepción y todas las dificultades observables en dicho lugar. **La Investigación Documental.**- Estuvo referida principalmente al conocimiento, que se obtuvo de los archivos y registros con la intención de constatar la veracidad de datos obtenidos por otras fuentes respecto a acciones ejecutadas en otros lugares frente a esta problemática.

El instrumento que se aplicó en la unidad de análisis fueron principalmente los formatos de conteo vehicular, que figura en el anexo correspondiente.

Se considerará las no documentadas como son:

3.6. POBLACIÓN Y MUESTRA

a) POBLACIÓN

Canteras que explotan material para base y sub base del valle del Mantaro de la región Junín

b) MUESTRA

La muestra de la investigación es intencionada, se tomó la muestra de material representativo para base y sub base de canteras Umuto y Sicaya.

3.7. TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE INFORMACIÓN

3.6.1. INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

Los instrumentos utilizados para recolección de información son: observación (personal-directa), manuales, revistas de ingeniería, libros, el reglamento nacional de edificaciones, libros especializados en análisis y diseño de pavimentos e información de páginas actualizadas en investigación de internet.

La Observación Indirecta.- Inspección de un fenómeno sin entrar en contacto con él, sino tratándolo a través de métodos específicos que permitan hacer las observaciones pertinentes de sus características y comportamientos. De esta manera se aplicaron los modelos planteados para el análisis de contribución del material de canteras en el desempeño de los modelos de pavimento aplicando los criterios de la CRR para esfuerzos verticales, Criterio de Shell para deformaciones y el criterio de Huang para las deflexiones.

La Investigación Documental.- Con la finalidad de estructurar el proceso de análisis que efectuaron diversos investigadores a las capas del pavimento, se recopiló diversos estudios enfocados al análisis y diseño de pavimento flexible y al análisis del comportamiento de las capas granulares frente a la acción de cargas. Se obtuvo archivos y registros de estas investigaciones respecto al análisis de la problemática.

El instrumento que se aplicó en la unidad de análisis fue la evaluación del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya, se analizaron los modelos propuestos de pavimento flexible mostrados en el manual PT-62 del ICG.

Mediante la evaluación se estimó la participación de la base y sub base en la disminución de los esfuerzos verticales dentro de la estructura, las deformaciones y deflexiones que producen las cargas de un vehículo del tipo C2, el análisis se realizó dentro de los modelos matemáticos planteados por la mecánica de pavimentos para el análisis de pavimento flexible mediante el empleo del programa Bisar 3.0, siendo los resultados de la evaluación de cada modelo de pavimento propuesto, los mostrados en láminas en la parte de anexos Nro. 05 y en el Anexo Nro. 06 de la propuesta de aumento de espesores.

3.6.2. TÉCNICAS DE CAMPO:

a) Recolección de datos

- Toma de muestras de canteras.

- Toma de coordenadas UTM de las canteras.
- Realización ensayos de mecánica de suelos (EMS) del material de cantera.

b) Recolección de la información

- Fase de Pre-campo

- Elección de canteras.
- Elección de modelos estructurales del PT-62.

- Fase de campo

- Toma de muestras del material granular de las canteras elegidas.

- Fase de Gabinete

- Comparación de resultados obtenidos de los EMS con los requerimientos de la Norma CE.010 Pavimentos Urbanos.
- Evaluación del desempeño del material para base y sub base en la disminución de los estados tensionales en los modelos de pavimento flexible para subrasante de CBR menor al 10%.

3.8. TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN

El procesamiento de información se basa en la aplicación de modelos de análisis y evaluación planteados por diversos investigadores en el área del análisis de pavimentos, las ecuaciones fueron tomadas del libro: Pavement Analysis and Design, Yang H. Huang. 2004. Y criterios los mostrados en el libro: Nociones sobre el método de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras, redactado por el Ing. Carlos Hernando Higuera Sandoval director de la escuela de Transportes y Vías, UPTC, Colombia.

Con el empleo del programa de Microsoft Excel se elaboraron hojas de cálculo a partir de las ecuaciones y criterios antes mencionados para la realización del análisis del material para base y sub base de las canteras evaluadas. Además se empleó los programas de Microsoft Word para la redacción de la investigación, y el empleo de AutoCAD para graficar los planos de canteras de los materiales analizados.

3.9. CRITERIO DE VALIDEZ Y CONFIABILIDAD DE LOS INSTRUMENTOS

En la investigación se adjunta en la parte del Anexo Nro. 04 los resultados de los estudios de mecánica de suelos, con finalidad de caracterizar al material de las canteras Umuto y Sicaya. Además se adjunta las láminas resultantes de la evaluación y análisis del desempeño estructural del material para base y sub base con ambos materiales desarrollados en el software Bisar 3.0 desarrollado por la Shell , donde se detalla la evaluación realizada de los esfuerzos, deformaciones y deflexiones estimados numéricamente.

La obtención de los diversos resultados se basa en:

- Estudios de mecánica de suelos: Normas ASTM.
- Requerimientos de calidad del material para base y sub base, Norma CE.010, Pavimentos Urbanos.
- Manual de Carreteras Suelos, Geología, Geotecnia y pavimentos. Sección suelos y pavimentos. ICG.
- Reglamento Nacional de Vehículos, DECRETO SUPREMO N° 058-2003-MTC. (2003).
- Software Bisar 3.0. Diseño y evaluación de pavimentos.

3.10. PROCESO DEL ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MATERIAL DE CANTERA PARA BASE Y SUB BASE, PAVIMENTO FLEXIBLE

Con la finalidad de evaluar la calidad del material de las canteras analizadas para su empleo como material para base y sub base, se compararon los resultados obtenidos de los estudios de mecánica de suelos con los requerimientos de calidad citados en norma CE.010 pavimentos urbanos. Para evaluar la contribución del material de las canteras a un adecuado desempeño del pavimento flexible, se analizaron los modelos propuestos del catálogo de estructuras del ICG, Manual Pt-62. Con la aplicación de las cargas de un vehículo del tipo C2 en los modelos matemáticos (rueda simple y rueda doble), se evaluaron los esfuerzos verticales actuantes sobre la subrasante, las deformaciones radiales, deformaciones verticales y deflexiones que se producen en la estructura en función a los criterios recomendados de máximos esfuerzos, deformaciones y deflexiones. Los modelos de pavimento flexible fueron extraídos del manual el PT-62 (2015). **Manual de carreteras suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección: suelos y pavimentos** (4ta ed.) Lima: (p.107, 108), los cuales son propuestos para subrasante de CBR menor al 10%. Se procedió con la comparación de los resultados obtenidos de la evaluación del material de cada cantera, analizando su contribución al desempeño de la estructura del pavimento mediante los criterios establecidos para máximos esfuerzos sobre la subrasante, (criterio de CRR de Bélgica), deformaciones excesivas (criterio Shell) y el criterio de máximas deflexiones en el pavimento propuesto por Yang H. Huang.

A. APLICACIÓN DEL PROGRAMA BISAR 3.0

La investigación emplea el programa BISAR 3.0 el cual emplea el METODO SHELL en la etapa de diseño de pavimentos, siendo su enfoque de diseño el método analítico mecanicista, el cual hace énfasis al cálculo de esfuerzos.

El método de diseño mecanicista considera la estructura del pavimento como un sistema de multicapas que es linealmente elástica, bajo la acción de las cargas del tránsito vehicular, en el cual los materiales se caracterizan por su módulo de elasticidad (E) y su relación de Poisson (ν) los materiales de la estructura se consideraran y se asumirá que las capas son de extensión infinita en el sentido horizontal el programa BISAR 3.0 que le permite calcular esfuerzos, deformaciones y deflexiones en cualquier punto de la estructura del pavimento flexible lo que permite analizar cada componente que conforma el pavimento.

CAPÍTULO IV

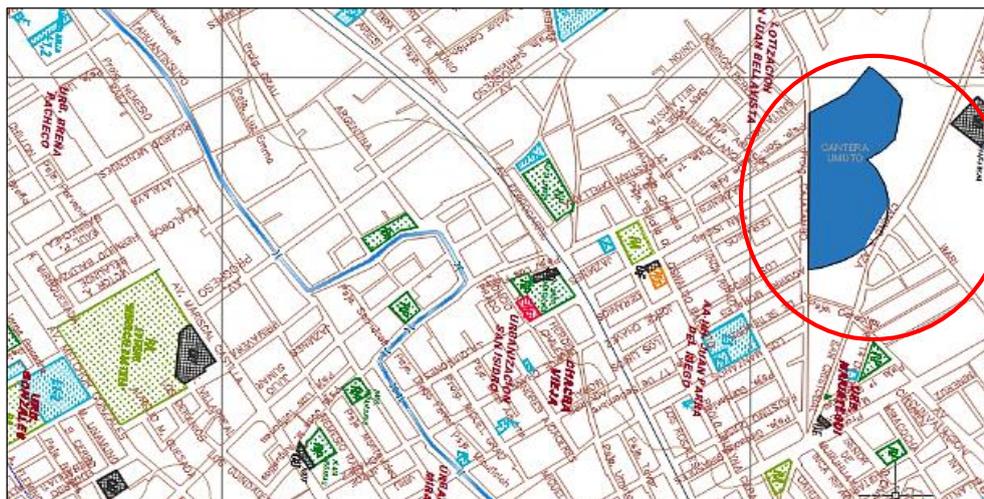
PRESENTACIÓN DE RESULTADOS

4.1. CARACTERÍSTICAS DE LAS CANTERAS

A. Cantera Umuto

La cantera Umuto está ubicada en el distrito de El Tambo, provincia de Huancayo, departamento de Junín; ubicada a 250 metros del Km. 14+000 de la carretera central margen izquierda, el material de extracción se emplea como base y sub base el cual pasa por un proceso de zarandeado, triturado y combinación de agregados.

Figura Nro. 19: Ubicación cantera Umuto

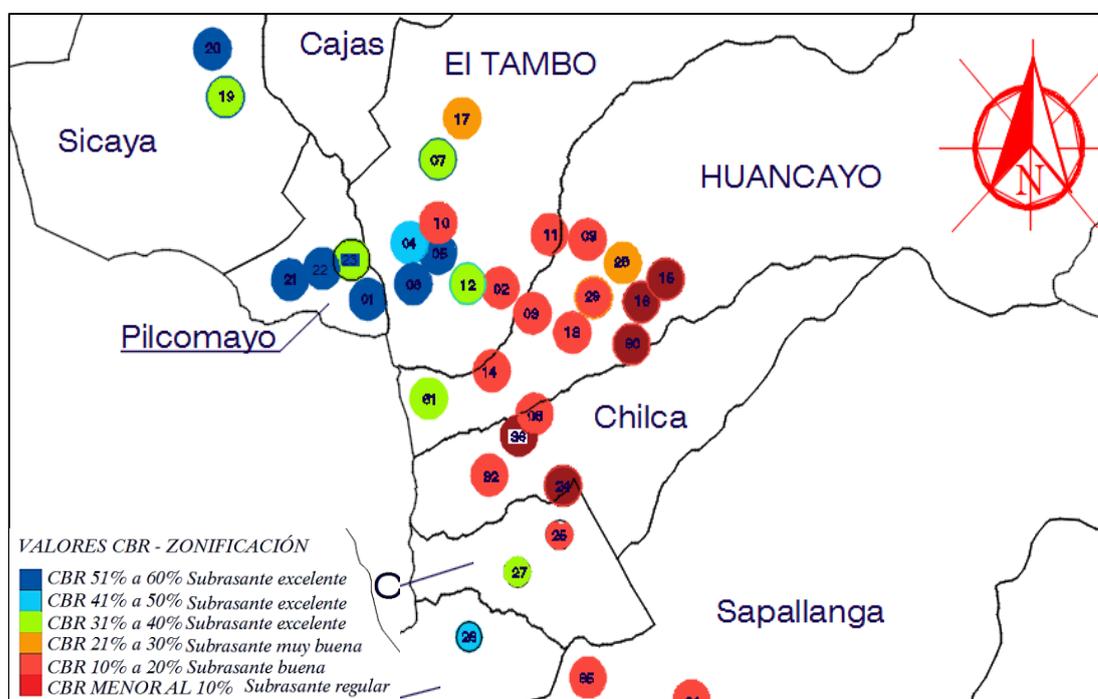


Fuente: Plano de desarrollo urbano de Huancayo

4.2. UBICACIÓN DE ZONAS CON SUELO DE CARACTERÍSTICA DE CBR REGULAR.

Se evidencia zonas de distribución del material de las canteras que poseen la características de suelos de CBR regular, el plano de zonificación de CBR en distritos mostrado en la parte de Anexos muestra los diversos puntos donde el suelo posee estas características, el cual se elaboró con los datos recopilados de CBR de subrasante tomados de diversas obras de pavimentación.

Figura Nro. 21: CBR de subrasante en distritos



Fuente: Elaboración propia

El distrito de El Tambo posee suelos de CBR excelente, se aprecia que al este del distrito de Huancayo los suelos alcanzan un CBR próximo al 10% del CBR. En los jirones Flor de Lino y Jr. Linaceas ubicados en la corona del Fraile y Torre Torre el CBR es del tipo Regular, los valores de CBR en la subrasante de los suelos en San Carlos son próximos al 10%, se observa que en el pasaje Santa lucia alcanza un CBR del 11.60% de al 95% de su MDS.

Tabla Nro. 14: CBR en diferentes distritos de Huancayo

Punto	Distrito	Ubicación	CBR 100%	CBR 95%
1	Pilcomayo	Jr Las Balsas	51.10	48.00
21	Pilcomayo	Jr Jose Olaya	53.50	40.00
22	Pilcomayo	Jr Jose Olaya	52.20	47.00
23	Pilcomayo	Jr Jose Olaya	52.40	39.00
4	El Tambo	Av. Evitamiento	45.80	43.00
5	El Tambo	AA.HH. Justicia Paz y Vida	59.80	58.20
6	El Tambo	AA.HH. Justicia Paz y Vida	58.80	55.20
7	El Tambo	AA.HH. Justicia Paz y Vida	52.60	38.60
17	El Tambo	Jr. Manco Capac, Av. Comas Cement. Gral.	22.80	20.10
12	El Tambo	Jr. Libertad cuadra 19	41.60	38.70
9	Huancayo	Calle Santa Lucia - San Carlos	13.80	11.80
10	Huancayo	Calle Las Margaritas y Quinuales	13.60	12.40
11	Huancayo	Calle Los Girazoles y Quinuales	13.80	12.60
2	Huancayo	Coop. de Vivienda Santa Isabel	13.50	12.20
3	Huancayo	Coop. de Vivienda Santa Isabel	13.60	12.40
14	Huancayo	Jr. Catalina Huanca	18.40	17.20
15	Huancayo	Jr. Flor de Lino	10.50	8.80
16	Huancayo	Jr. Linaceas	14.50	10.00
18	Huancayo	Jose Olaya Huancayo	13.40	11.60
28	Huancayo	Av. La Victoria km. 0+770	26.80	21.80
29	Huancayo	Av. La Victoria km. 0+005	14.10	10.90
30	Huancayo	Av. San Luis - Corona del frayle	12.60	8.60
31	Huancayo	Via de Evit. con Av Daniel Alcides Carrion	31.4	30.1
13	Cullhuas	Parque Principal	13.40	12.60
8	Chilca	Jr. Los Sauces, Psje Tores	13.50	12.90
24	Chilca	Psje. Esmeralda Chilca	9.41	8.30
36	Chilca	Psje Los Heroes Chilca	15.00	9.40
32	Chilca	Jr. Riva Agüero	12.4	11.30
19	Sicaya	Cantera Sicaya	54.10	40.00
20	Orcotuna S	Canal de Riego Plan Merys	82.40	66.00
25	Pucara	Barrio Asca Pucara	13.10	10.40
26	Huancan	Psje. Costa Verde	13.70	11.60
27	Huancan	Psje. Quilliscocha	40.80	38.90
33	Sapallanga	Rio Chacclas sapallanga	83.6	68.5
34	Sapallanga	Jr. Gonzales Prada	14.40	12.60
35	Sapallanga	Av. Dos de Mayo	13.40	15.60

Fuente: Elaboración propia, a partir de los datos recopilados de ensayos de CBR para obras de pavimentación, Huancayo

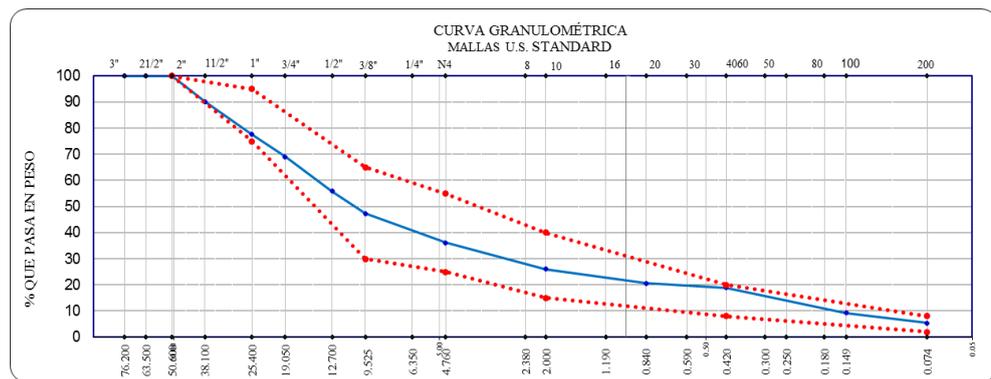
El distrito de Chilca posee suelos con subrasante de CBR menor al 10% en los que entrarían en la clasificación de subrasante de tipo regular.

4.3. ESTUDIO DE MECÁNICA DE SUELOS, CANTERAS UMUTO Y SICAYA

A. Análisis granulométrico por tamizado, Norma ASTM D 422

El resultado de ensayo del análisis granulométrico nos muestra la curva representativa del material granular de las canteras Umuto y cantera Sicaya. En las figuras Nro. 22 y Nro.23 se muestra la curva granulométrica cantera Umuto y Sicaya, las líneas rojas representan el entorno del requerimiento para la gradación A, el cual es recomendado por la norma CE.010. La línea azul, la curva granulométrica del material de la cantera Umuto.

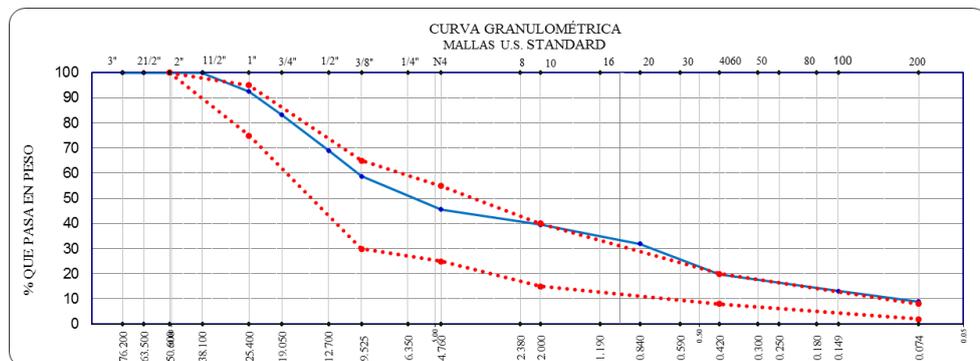
Figura Nro. 22: Curva granulométrica Cantera Umuto



Fuente: Elaboración propia

Curva granulométrica del material, Cantera Umuto dentro del entorno de calidad recomendado por la norma.

Figura Nro. 23: Curva granulométrica Cantera Sicaya



Fuente: Elaboración propia

Curva granulométrica del material, Cantera Sicaya dentro del entorno de calidad recomendado por la norma.

B. Límites de consistencia, Norma ASTM D4318

Con la finalidad de determinar los límites de Atterberg se procedió con la ejecución del ensayo, el cual se resume en la tabla Nro. 15.

Tabla Nro. 15: Limite de consistencia. Canteras: Umuto y Sicaya

Ensayo	NORMA	CANtera UMUTO	CANtera SICAYA
Límite Líquido (%)	ASTM D-4318	10.01%	9.64%
Límite Plástico (%)	ASTM D-4318	8.23%	8.39%
Índice de Plasticidad (%)		1.78%	1.25%

Fuente: Elaboración propia, a partir de los resultados de los EMS

El límite líquido para el material de sub base es como máximo del 25%, ambos materiales cumplen con el requerimiento. El índice de plasticidad se encuentra dentro de lo que recomienda la norma para su empleo como sub base que es del 4%, mientras que para base granular es como máximo del 2%, por lo que ambos materiales exceden a lo recomendado.

C. Clasificación del material granular

De los ensayos anteriores observamos que el material granular de la cantera Sapallanga es encaja en la clasificación siguiente:

Tabla Nro. 16: Clasificación del material para base y sub base. Canteras: Umuto y Sicaya

Descripción	Cantera Umuto	Cantera Sicaya
Clasificación SUCS	GM	GM
Clasificación AASHTO	A-1-a(0)	A-2-4(0)
Gradación A	Cumple	No cumple

Fuente: Elaboración propia, a partir de los resultados de los EMS

Material de la cantera Umuto:

Clasificación según SUCS: GM, Grava bien escalonada, grava sedimentaria, arenosa arcillosa.

Según AASHTO se trata de un tipo de suelo A-1-a (0), siendo una grava con partículas finas de granulometrías bien definidas.

Material de la cantera Sicaya:

Clasificación según SUCS: GW, grava bien escalonada, gravas arenosas, con escasos finos.

Según AASHTO un A-2.4 (0), Material granular con partículas finas limosas.

D. Sales solubles totales, Método MTC E 219

El material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya presentan porcentajes de sales solubles totales menores al máximo recomendado en la norma, que del 1%, ver tabla Nro.17.

Tabla Nro. 17: sales solubles totales. Canteras: Umuto y Sicaya

Ensayo	Tipo	CANtera UMUTO	CANtera SICAYA
Sales Solubles Totales	Agregado fino	0.166	0.21%
	Agregado grueso	0.120	0.45%

Fuente: Elaboración propia, a partir de los resultados de los EMS

E. Abrasión los ángeles, Norma ASTM C 131

El material de la cantera Sicaya presenta una menor abrasión siendo de 10.28%, la cantera Umuto presenta una abrasión de 13.70%. Ambos materiales cumplen el requerimiento respecto al ensayo de Abrasión los Ángeles, el cual es de un máximo del 50%, ver tabla Nro. 18.

Tabla Nro. 18: Abrasión los Ángeles. Canteras: Umuto, Sicaya

Ensayo	Norma	Cantera Umuto	Cantera Sicaya
Abrasión los Ángeles	ASTM C 131	13.70%	10.28%

Fuente: Elaboración propia, a partir de los resultados de los EMS

F. Ensayo Próctor Modificado, Norma ASTM D-1557

El material de la cantera Umuto necesita un contenido de humedad del 12.82% para que alcance su máxima densidad seca la cual es de 2.110 gr/cm³. El material de la cantera Sicaya alcanza su máxima densidad seca de 2.250 gr/cm³ al ser compactado cuando este alcanza un 9.00% de su óptimo contenido de humedad, ver tabla Nro.19.

Tabla Nro. 19: Próctor modificado. Canteras: Umuto, Sicaya

Ensayo	Norma	Cantera Umuto	Cantera Sicaya
Próctor Modificado	ASTM D-1557	MDS: 2.110 gr/cm ³ OCH: 12.82%	MDS: 2.250 gr/cm ³ OCH: 9.00%

Fuente: Elaboración propia, a partir de los resultados de los EMS

G. Ensayo California Bearing Ratio (C.B.R.), Norma ASTM D1883-91

El material de la cantera Umuto alcanza un CBR de 74.90% al 100% de su máxima densidad seca, por tal motivo el material de la cantera Umuto cumple el requerimiento para su empleo como material para sub base, pero no es recomendado como material para base. Se requiere un mínimo del 80% de CBR para vías locales y conectoras y del 100% para Arteriales y expresas.

El material de la cantera Sicaya reúne los requerimientos para su empleo tanto como sub base, siendo la base recomendado solo en vías locales y conectoras, ver tabla Nro. 20.

Tabla Nro. 20: Ensayo California Bearing Ratio. Canteras: Umuto, Sicaya

Ensayo	Norma	Cantera Umuto	Cantera Sicaya
California Bearing Ratio (C.B.R.)	ASTM D1883	95% MDS. 73.20%	95% MDS. 70.0%
		100% MDS. 74.90%	100% MDS. 82.80%

Fuente: Elaboración propia, a partir de los resultados de los EMS

H. Ensayo Equivalente de Arena, Norma ASTM D 2419

El porcentaje total del equivalente de arena del material de la cantera Umuto es del 60.50%, mientras que el material de la cantera Sicaya es del 61.85%. Del resultado del ensayo, ambos materiales cumplen con el requerimiento.

I. Determinación de porcentaje con caras fracturadas MTC E 220-5821

El porcentaje total del equivalente de partículas que presentan caras fracturadas del material de la cantera Umuto es del 81.4% para el agregado grueso y 51.4% para el fino, mientras que el material de la cantera Sicaya para el agregado grueso es de 83.7% y para el fino de 51.0%. Ambos materiales de cantera cumplen con el requerimiento de la norma, ver tabla Nro. 21.

Tabla Nro. 21: Porcentaje con caras fracturadas. Cantera Umuto y Sicaya

Ensayo	Agregado	Cantera Umuto	Cantera Sicaya
Porcentaje con caras fracturadas	Agregado grueso	81.4%%	83.7%
	Agregado fino	51.4%	51.0%

Fuente: Elaboración propia, a partir de los resultados de los EMS

J. Ensayo de durabilidad y ensayo de pérdida con sulfato de sodio y sulfato de magnesio

Los resultados de los ensayos de durabilidad muestran que los materiales de las canteras cumplen con los requisitos mencionados en la norma. La norma sugiere que para el caso del agregado grueso, la pérdida con sulfato de sodio es de un 12% como máximo y por sulfato

de magnesio un 18%. Para el agregado fino el índice de durabilidad menciona un mínimo de un 35%, ver tabla Nro. 22.

Tabla Nro. 22: Porcentaje con caras fracturadas. Cantera Umuto y Sicaya

Ensayo	Agregado	Cantera Umuto	Cantera Sicaya
Sulfato de Magnesio ASTM C-88	Grueso	11.874%%	7.811%
Sulfato de Sodio ASTM C-88	Grueso	7.083%	9.448%
Índice de Durabilidad MTC E-214	Fino	37.68%	36.88%

Fuente: Elaboración propia, a partir de los resultados de los EMS

Tabla Nro. 23: Resumen Resultado de E.M.S. Cantera Umuto. Material para Base y Sub Base Granular

CANTERA UMUTO						
Estudios de Mecánica de Suelos E.M.S.	Norma ASTM	Resultados de los Ensayos	Requerimiento Sub Base	Observación	Requerimiento Base	Observación
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D-422	Se encuentra dentro del entorno.	Gradación A	Cumple	Gradación A	Se encuentra dentro del entorno.
Clasificación SUCS	ASTM D-2487	GM	Grava sedimentaria, arenosa arcillosa.			
Clasificación AASHTO	ASTM M-145	A-1-a(0)	Grava con partículas finas de granulometrías bien definidas.			
Límite Líquido (%)	ASTM D-4318	10.01%	Máximo 25%	Cumple.	No especifica.	---
Límite Plástico (%)	ASTM D-4318	8.23%	No especifica.	---	No especifica.	---
Índice de Plasticidad (%)		1.78%	Máximo 4%.	Cumple.	Máximo 2%	Cumple.
Abrasión los Ángeles	ASTM C 131	13.70%	Máximo 50%	Cumple.	Máximo 40%	Cumple.
Próctor Modificado	ASTM D-1557	MDS: 2.110 gr/cm3 OCH: 12.82%	No especifica.	---	No especifica.	---
California Bearing Ratio (C.B.R.)	ASTM D1883	95% MDS. 73.20% 100% MDS. 74.90%	Mínimo 40%	Cumple.	Mín. 80%, vías locales y conectoras.	No recomendable para Arteriales y Expresas
					Mín. 100% Arteriales y Expresas.	
Equivalente de arena	ASTM D 2419	60.50%	35% mínimo	Cumple	45% mínimo	Cumple
Sales Solubles Totales	MTC E 219	Agregado Fino: 0.166% Agregado Grueso: 0.120%	Máximo 1%	Cumple.	Máximo 0.5%	Cumple.
Caras fracturadas	MTC 210 ASTM D5821	Con una sola cara fracturada: 81.4%	---	No especifica	80% mínimo	Cumple.
		Con dos caras fracturadas 51.4%	---	No especifica	50% mínimo	Cumple.
Ensayo de Durabilidad	Perdida de Sulfato de Sodio ASTM C-88	Agregado grueso: 7.083%	---	No especifica	12% máximo	Cumple.
	Perdida de Sulfato de Magnesio ASTM C-88	Agregado grueso: 11.874%	---	No especifica	18% máximo	Cumple.
Índice de Durabilidad	MTC E-214	Agregado fino: 37.68%	---	No especifica	35% mínimo	Cumple.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de los resultados obtenidos del E.M.S. y Requerimientos de calidad para base y sub base

Tabla Nro. 24: Resumen Resultado de E.M.S. Cantera Sicaya. Material para Base y Sub Base Granular

CANTERA SICAYA						
Estudios de Mecánica de Suelos E.M.S.	Norma ASTM	Resultados de los Ensayos	Requerimiento Sub Base	Observación	Requerimiento Base	Observación
Análisis granulométrico por tamizado	ASTM D-422	No se encuentra dentro del entorno.	Gradación A	No cumple	Gradación A	Exceso de material fino.
Clasificación SUCS	ASTM D-2487	GM	Grava sedimentaria, arenosa arcillosa.			
Clasificación AASHTO	ASTM M-145	A-2-4(0)	Material granular con partículas finas limosas.			
Límite Líquido (%)	ASTM D-4318	9.64%	Máximo 25%	Cumple.	No especifica.	---
Límite Plástico (%)	ASTM D-4318	8.39%	No especifica.	---	No especifica.	---
Índice de Plasticidad (%)		1.25%	Máximo 4%.	Cumple.	Máximo 2%	Cumple.
Abrasión los Ángeles	ASTM C 131	10.28%	Máximo 50%	Cumple.	Máximo 40%	Cumple.
Próctor Modificado	ASTM D-1557	MDS: 2.250 gr/cm3 9.00% OCH:	No especifica.	---	No especifica.	---
California Bearing Ratio (C.B.R.)	ASTM D1883	95% MDS. 70.00% 100% MDS. 82.80%	Mínimo 40%	Cumple.	Mín. 80%, vías locales y conectoras. Mín. 100% Arteriales y Expresas.	No recomendable para Arteriales y Expresas
Equivalente de arena	ASTM D 2419	61.85%	35% mínimo	Cumple	45% mínimo	Cumple
Sales Solubles Totales	MTC E 219	Agregado Fino: 0.210% Agregado Grueso: 0.452%	Máximo 1%	Cumple.	Máximo 0.5%	Cumple.
Caras fracturadas	MTC 210 ASTM D5821	Con una sola cara fracturada: 83.7%	---	No especifica	80% mínimo	Cumple.
		Con dos caras fracturadas 51.0%	---	No especifica	50% mínimo	Cumple.
Ensayo de Durabilidad	Perdida de Sulfato de Sodio ASTM C-88	Agregado grueso: 9.448%	---	No especifica	12% máximo	Cumple.
	Perdida de Sulfato de Magnesio ASTM C-88	Agregado grueso: 7.811%	---	No especifica	18% máximo	Cumple.
Índice de Durabilidad	MTC E-214	Agregado fino: 36.88%	---	No especifica	35% mínimo	Cumple.

Fuente: Elaboración Propia, a partir de los resultados obtenidos del E.M.S. y Requerimientos de calidad para base y sub base

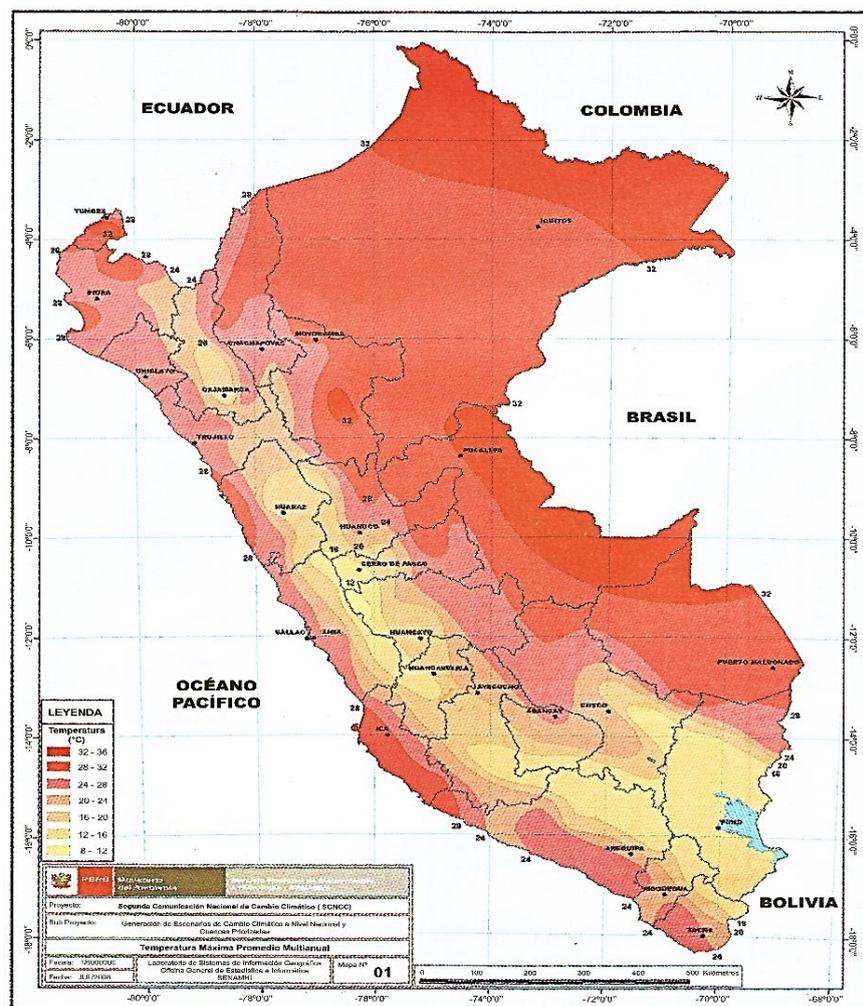
4.1. DESEMPEÑO DEL MATERIAL DE CANTERAS UMUTO Y SICAYA APLICADO EN MODELOS ESTRUCTURARLES DE PAVIMENTO FLEXIBLE

Se empleó los modelos de pavimento flexible propuestos en el manual PT-62 del ICG considerando lo siguiente:

A. MODULO DE LA CARPETA ASFÁLTICA

Una de las limitaciones en la presente investigación es el empleo del módulo de la carpeta asfáltica, existen diferentes valores, los cuales varía en función a su temperatura.

Figura Nro. 24: Temperatura máxima promedio multianual



Fuente: SENAMHI, Mapa de Temperatura promedio Anual, 2009

En nuestro país no se realizaron estudios para determinar dicho valor, por este motivo se empleó los resultados de las investigaciones realizadas en el país de Colombia, publicadas en la Guía Metodológica Para El Diseño de Obras De Rehabilitación de Pavimentos Asfálticos de Carreteras (INVIAS - Colombia, 2002). En la tabla 3.4.5 de esta guía se recomienda el empleo del módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica de 2413 MPa para una temperatura comprendido entre los 20°C a los 27°C.

En el distrito de Huancayo la temperatura máxima promedio varía entre los 20°C a los 24°C por lo que el módulo recomendado puede ser empleado para fines de análisis en la presente investigación.

B. PROCESO DE ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL MATERIAL DE CANTERA

La evaluación del desempeño de la estructura del pavimento ha sido y es tema de estudio por diversos investigadores.

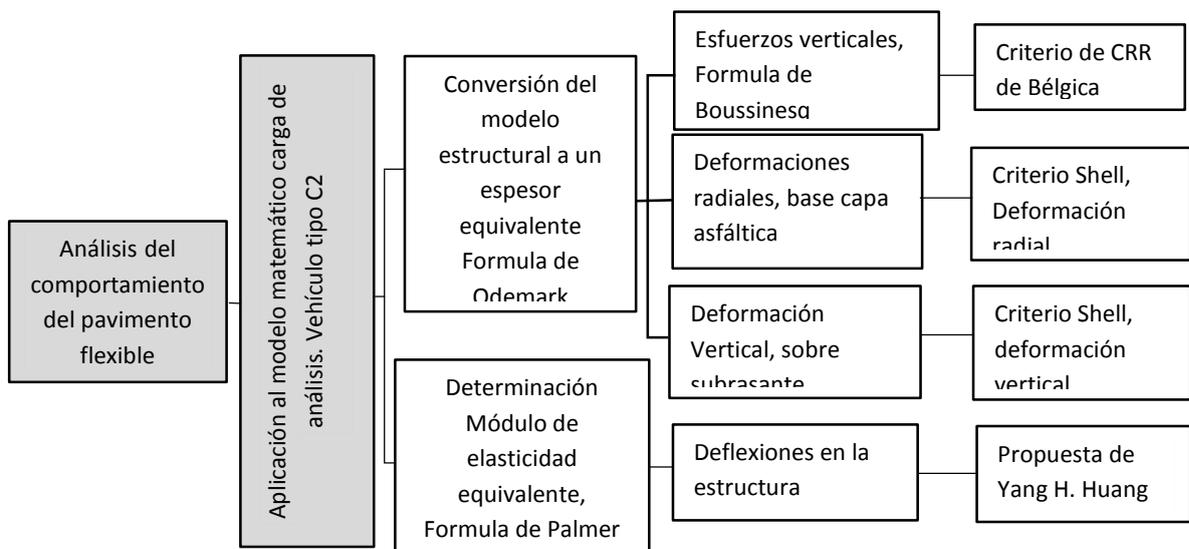
La finalidad de la investigación es la de analizar cómo afectan las cargas de un vehículo pesado a las estructuras de pavimento analizados para ello se empleó un vehículo del tipo C2, las cargas que transmiten las rueda simple y rueda doble se aplicaron en las diversas ecuaciones para estimar los esfuerzos verticales, deformaciones radiales, deformaciones verticales y deflexiones que los modelos presentan con la participación del material de la cantera Umuto y Sicaya como base y sub base.

Las características de las capas granulares, (base y sub base) son las obtenidas de los ensayos de laboratorio de la canteras Umuto y Sicaya.

Se tomó como valor referencial para fines de cálculo las características de la carpeta asfáltica nombradas en la tabla 3.4.5 de la Guía Metodológica Para El Diseño De Obras De Rehabilitación De Pavimentos Asfálticos De Carreteras (INVIAS - Colombia, 2002). Donde hace referencia al módulo de elasticidad de la carpeta asfáltica de 2413 MPa. Se efectuó el cálculo de las estimaciones en los siguientes puntos de análisis:

- a. Esfuerzos verticales.
- b. Deformaciones radiales.
- c. Deformaciones verticales.
- d. Deflexiones en la estructura.

Figura Nro. 25: Proceso, Análisis del comportamiento del pavimento flexible.



Fuente: Elaboración Propia

4.2. CONSIDERACIONES EN LA EVALUACIÓN DE LOS MODELOS DE PAVIMENTO CON LA CONTRIBUCIÓN DEL MATERIAL DE CANTERAS

El análisis de los estados tensionales se realizó para una rueda simple, carga de 5.62 kg/cm² y la carga de 4.01 kg/cm² para una rueda doble. El modelo de pavimento se tomó del Manual PT-62 del ICG.

La carpeta asfáltica es de módulo 2413 MPa, material para base y sub base procedente de cantera Sicaya, subrasante de CBR 6%. El análisis se realizó para una rueda simple. El radio de contacto de 0.1408 m. Para el análisis se asumió el valor del coeficiente de Poisson de: carpeta asfáltica 0.35, base y sub base de 0.40 y para subrasante de 0.50. En base a los coeficientes mencionados en la Tabla Nro. 25.

Tabla Nro. 25: Coeficientes de Poisson, ingeniería de pavimentos.

Material de pavimento	Coeficiente de Poisson (μ) Sugerido
Mezcla asfáltica	0.25 – 0.40
Base o sub base granular no ligada	0.30 – 0.40
Base o sub base estabilizada químicamente	0.20 - 0.35
Macizo semi infinito (subrasante)	0.25 - 0.50

Fuente: Martínez, R. (2016). *Procedimiento para el diseño estructural de pavimentos flexibles rehabilitados en Cuba con el empleo de bases recicladas utilizando ligantes asfálticos*. p. 60.

A. Esfuerzo Vertical sobre la subrasante (ϵ_z)

De la evaluación realizada de los modelos de pavimento flexible con el programa Bisar 3.0 se observó que, para la carga que transmite la rueda simple, la carpeta asfáltica disminuye entre un 16.6% a un 75.1% para el caso de los modelos de pavimento que emplean material de la cantera Umuto como base y sub base (ver Tabla Nro. 26), mientras que en los modelos donde se emplearía el material de la cantera Sicaya la carpeta asfáltica se encarga de disminuir entre un 15.5% a un 74.3% de los esfuerzos verticales, (ver Tabla Nro. 27)

Al evaluar la contribución del material para base y sub base de las canteras para un grado de compactación del 100%, el material de la cantera Umuto disminuye entre el 42.2% para un Tp0 decreciendo hasta un 6.4% para el modelo propuesto para un tipo de tráfico de un Tp14 (ver tabla Nro.26). El material para base y sub base de la cantera Sicaya disminuye entre el 42.6% para un Tp0 decreciendo hasta un 6.4% en el Tp14, (ver Tabla Nro. 27)

De emplearse el material de la cantera Umuto, los modelos de pavimento propuesto para los Tp0 y Tp1 presentaría excesivos esfuerzos verticales actuantes sobre la subrasante, alcanzando entre 114.9% y 107.2% respectivamente de lo recomendado por el criterio de la CRR (ver Tabla Nro. 26). Los modelos evaluados con el material de la cantera Sicaya, presentan en los modelos de pavimento para los Tp0 y Tp1 esfuerzos verticales excesivos los cuales varían entre 111.8% y 107.2% de lo recomendado por el criterio de la CRR (ver Tabla Nro. 27). El resumen de la evaluación realizada para una rueda simple se detalla en las Tablas Nro. 26 para el material para base y sub base de la cantera Umuto y Tabla Nro. 27 para el material de la cantera Sicaya, las cuales son mostradas a continuación.

Tabla Nro. 26: Análisis del comportamiento del esfuerzo vertical. Material de la cantera Umuto en Kg/cm² para una rueda simple.

UMUTO	Descripción	Tp0	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	Tp11	Tp12	Tp13	Tp14
Contribución disminución Esf. Verticales por capas.	%Esf. Dism. por carpeta asfáltica	16.6%	25.3%	24.4%	32.9%	40.5%	40.0%	46.2%	46.0%	56.5%	60.7%	64.4%	67.6%	70.4%	72.8%	75.1%
	% Esf. Dism. por Base y Sub Base	72.2%	65.8%	69.0%	61.2%	54.0%	55.5%	50.3%	51.0%	41.0%	36.8%	33.3%	30.1%	27.5%	25.4%	23.2%
	Carga disipado por Base y Sub Base Granular (kg/cm ²)	4.058	3.696	3.880	3.440	3.034	3.121	2.825	2.867	2.302	2.070	1.874	1.693	1.543	1.426	1.305
	% Esf. Actuante en la subrasante	11.2%	8.9%	6.6%	5.9%	5.6%	4.5%	3.5%	3.0%	2.6%	2.4%	2.3%	2.2%	2.1%	1.8%	1.7%
	(1)Esfuerzo Subrasante (kg/cm ²)	0.631	0.502	0.371	0.333	0.312	0.252	0.197	0.166	0.144	0.137	0.128	0.126	0.118	0.101	0.097
Criterio CRR Bélgica	(2)Esf. Adm. Subrasante (kg/cm ²)	0.549	0.468	0.417	0.380	0.356	0.324	0.276	0.246	0.224	0.210	0.199	0.191	0.179	0.170	0.163
	Relación (1)/(2): Esf. Vert. Subr./ Esf. Vert. Adm.	114.9%	107.2%	88.9%	87.8%	87.8%	77.9%	71.4%	67.5%	64.1%	65.5%	64.3%	65.8%	65.8%	59.5%	59.6%

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con el programa Bisar 3.0

Nota: El modelo pavimento propuesto para el Tp0 presenta excesivos esfuerzos verticales actuantes sobre la subrasante, alcanzado el 104.6% de lo recomendado por el criterio de la CRR de Bélgica. En los modelos para los Tp0 al Tp7 se aprecia una mayor participación en la disminución de esfuerzos verticales (77.2% a un 51%).

Tabla Nro. 27: Análisis del comportamiento del esfuerzo vertical. Material de la cantera Sicaya en Kg/cm² para una rueda simple.

SICAYA	Descripción	Tp0	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	Tp11	Tp12	Tp13	Tp14
Contribución disminución Esf. Verticales por capas	%Esf. Dism. por carpeta asfáltica	15.5%	24.4%	23.4%	31.8%	39.3%	38.8%	45.1%	44.9%	55.4%	59.7%	63.4%	66.7%	69.6%	72.0%	74.3%
	% Esf. Dism. por Base y Sub Base	73.6%	67.0%	70.2%	62.5%	55.3%	56.8%	51.5%	52.2%	42.1%	37.9%	34.4%	31.1%	28.4%	26.2%	24.0%
	Carga disipado por Base y Sub Base Granular (kg/cm ²)	4.138	3.763	3.945	3.510	3.106	3.192	2.894	2.936	2.366	2.132	1.932	1.749	1.595	1.475	1.350
	% Esf. Actuante en la subrasante	10.9%	8.7%	6.4%	5.8%	5.4%	4.4%	3.4%	2.9%	2.5%	2.4%	2.2%	2.2%	2.0%	1.8%	1.7%
	(1)Esfuerzo Subrasante (kg/cm ²)	0.614	0.488	0.360	0.324	0.304	0.245	0.192	0.161	0.140	0.134	0.125	0.122	0.115	0.099	0.095
Criterio CRR Bélgica	(2)Esf. Adm. Subrasante (kg/cm ²)	0.549	0.468	0.417	0.380	0.356	0.324	0.276	0.246	0.224	0.210	0.199	0.191	0.179	0.170	0.163
	Relación (1)/(2): Esf. Vert. Subr./ Esf. Vert. Adm.	111.8%	104.2%	86.4%	85.3%	85.4%	75.7%	69.4%	65.5%	62.3%	63.7%	62.6%	64.0%	64.1%	57.9%	58.1%

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con el programa Bisar 3.0

Nota: Los modelos pavimento propuestos para el Tp0 poseen un adecuado comportamiento, frente a la disminución de esfuerzos verticales actuantes sobre la subrasante, criterio de la CRR de Bélgica. En los modelos para los Tp0 al Tp7 se aprecia una mayor participación en la disminución de esfuerzos verticales (73.6% a un 52.2%).

Del análisis realizado de los modelos estructurales de pavimento flexible, con la carga de una rueda doble, la carpeta asfáltica disminuye entre el 13.1% a 68.3% al emplearse el material de la cantera Umuto, (ver Tabla Nro. 28) mientras que de emplearse el material de la cantera Sicaya la participación variaría entre 14.6% a un 67.5%, (tabla Nro.29)

De emplearse el material de la cantera Umuto en las conformación de las capas que constituyen la base y la sub estas disminuirían entre un 68.4% para un Tp0 decreciendo hasta un 28.5% en el caso del modelo para un Tp14, (ver Tabla Nro. 28), de emplearse el material de la cantera Sicaya en esta capas, estas disminuirían entre un 69.5% para un Tp0 decreciendo hasta un 29.4% en el Tp14, (ver Tabla Nro. 29)

La evaluación muestra que en los modelos de pavimento flexible con el material de la cantera Umuto, presentan excesivos esfuerzos verticales actuantes sobre la subrasante en los modelos para los Tp0 al Tp4 los cuales alcanzan 119.6%, 116%, 100.7%, 101.2% y 102.4% respectivamente del criterio mencionado. (Ver Tabla Nro. 28)

Los modelos evaluados con el material de la cantera Sicaya, se aprecia que para los modelos de pavimento propuestos para los Tp0 al Tp1 los esfuerzos actuantes sobre la sobre la subrasante alcanzan el 116.6% y 113.1% del criterio CRR de Bélgica recomendado, (ver Tabla Nro. 29).

El resumen de la evaluación realizada para una rueda doble se detalla en las Tablas Nro. 28 para el material para base y sub base de la cantera Umuto y Tabla Nro. 29 para el material de la cantera Sicaya, las cuales son mostradas a continuación.

Tabla Nro. 28: Análisis del comportamiento del esfuerzo vertical. Material de la cantera Umuto en Kg/cm² para una rueda doble.

UMUTO	Descripción	Tp0	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	Tp11	Tp12	Tp13	Tp14
Contribución disminución Esf. Verticales por capas	%Esf. Dism. por carpeta asfáltica	15.2%	22.7%	21.7%	29.0%	35.7%	35.0%	40.5%	40.2%	49.7%	53.8%	57.4%	60.6%	63.5%	65.9%	68.3%
	% Esf. Dism. por Base y Sub Base	68.4%	63.7%	67.8%	61.4%	55.2%	57.4%	53.4%	54.6%	45.7%	41.8%	38.5%	35.3%	32.7%	30.8%	28.5%
	Carga disipado por Base y Sub Base Granular (kg/cm ²)	2.834	1.879	2.017	1.738	1.473	1.535	1.347	1.381	1.024	0.886	0.774	0.674	0.595	0.537	0.477
	% Esf. Actuante en la subrasante	16.4%	13.5%	10.5%	9.6%	9.1%	7.5%	6.1%	5.2%	4.6%	4.4%	4.1%	4.1%	3.8%	3.3%	3.2%
	(1)Esfuerzo Subrasante (kg/cm ²)	0.657	0.544	0.420	0.384	0.364	0.303	0.244	0.209	0.183	0.176	0.166	0.163	0.153	0.133	0.129
Criterio CRR Bélgica	(2)Esf. Adm. Subrasante (kg/cm ²)	0.549	0.468	0.417	0.380	0.356	0.324	0.276	0.246	0.224	0.210	0.199	0.191	0.179	0.170	0.163
	Relación (1)/(2): Esf. Vert. Subr./ Esf. Vert. Adm.	119.6%	116.0%	100.7%	101.2%	102.4%	93.4%	88.2%	84.8%	81.9%	84.1%	83.2%	85.2%	85.7%	78.4%	78.8%

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con el programa Bisar 3.0

Nota: Los modelos para pavimento propuestos para: Tp0 al Tp4 presenta excesivos esfuerzos verticales actuantes sobre la subrasante, alcanzado entre 119.6% a un 102.4% del criterio de CRR de Bélgica. En los modelos para los Tp0 al Tp7 la base y sub base disminuyen entre los 68.4% a 54.6% de esfuerzos verticales.

Tabla Nro. 29: Análisis del comportamiento del esfuerzo vertical. Material de la cantera Sicaya en Kg/cm² para una rueda doble.

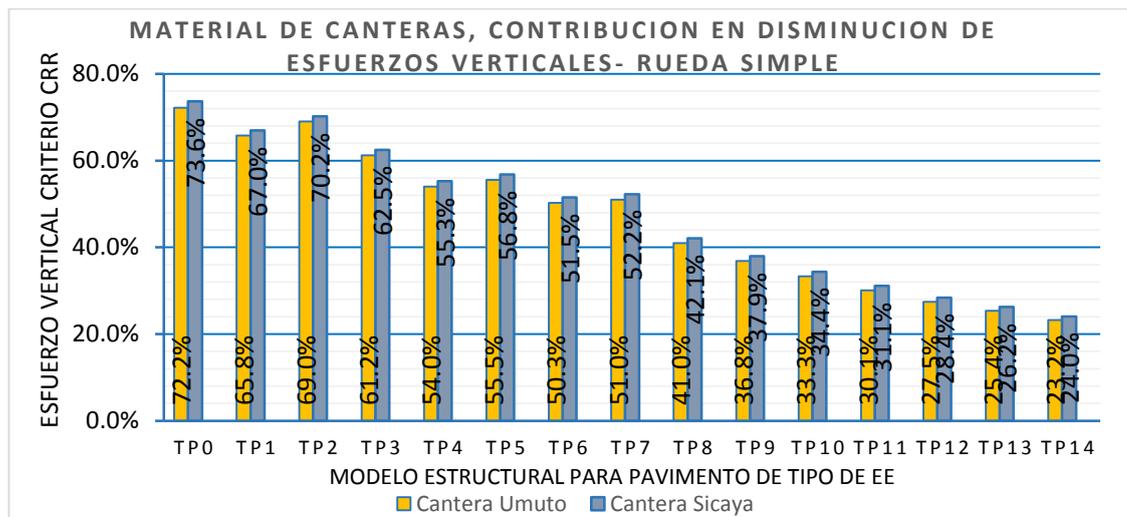
SICAYA	Descripción	Tp0	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4	Tp5	Tp6	Tp7	Tp8	Tp9	Tp10	Tp11	Tp12	Tp13	Tp14
Contribución disminución Esf. Verticales por capas	%Esf. Dism. por carpeta asfáltica	14.6%	22.0%	20.9%	28.1%	34.7%	34.1%	39.5%	39.2%	48.8%	52.9%	56.4%	59.8%	67.9%	65.1%	67.5%
	% Esf. Dism. por Base y Sub Base	69.5%	64.9%	68.9%	62.6%	56.4%	58.6%	54.6%	55.8%	46.8%	42.9%	39.5%	36.3%	28.4%	31.6%	29.4%
	Carga disipado por Base y Sub Base Granular (kg/cm ²)	2.789	2.604	2.768	2.512	2.265	2.351	2.192	2.239	1.878	1.721	1.588	1.457	1.140	1.271	1.179
	% Esf. Actuante en la subrasante	15.9%	13.2%	10.2%	9.3%	8.8%	7.3%	5.9%	5.0%	4.4%	4.3%	4.0%	4.0%	3.7%	3.2%	3.1%
	(1)Esfuerzo Subrasante (kg/cm ²)	0.640	0.530	0.408	0.374	0.355	0.294	0.237	0.203	0.178	0.172	0.161	0.159	0.149	0.130	0.125
Criterio CRR Bélgica	(2)Esf. Adm. Subrasante (kg/cm ²)	0.549	0.468	0.417	0.380	0.356	0.324	0.276	0.246	0.224	0.210	0.199	0.191	0.179	0.170	0.163
	Relación (1)/(2): Esf. Vert. Subr./ Esf. Vert. Adm.	116.6%	113.1%	98.0%	98.5%	99.8%	90.8%	85.8%	82.4%	79.6%	81.7%	80.9%	83.0%	83.5%	76.4%	76.8%

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con el programa Bisar 3.0

Nota: Los modelos para pavimento propuestos para: Tp0 al Tp1 presenta excesivos esfuerzos verticales actuantes sobre la subrasante, alcanzado entre 116.6% a un 113.1% del criterio de CRR de Bélgica. En los modelos para los Tp0 al Tp7 la base y sub base disminuyen entre los 69.5% a 55.8% de esfuerzos verticales.

De la contribución de las capas granulares en la disminución de los esfuerzos verticales, se observa que para el caso de una rueda simple, el material de la cantera Umuto disminuye entre el 72.2% al 23.2% de los esfuerzos verticales, mientras que el material de la cantera Sicaya disminuye entre el 73.6% a un 24%, (ver figura Nro. 26)

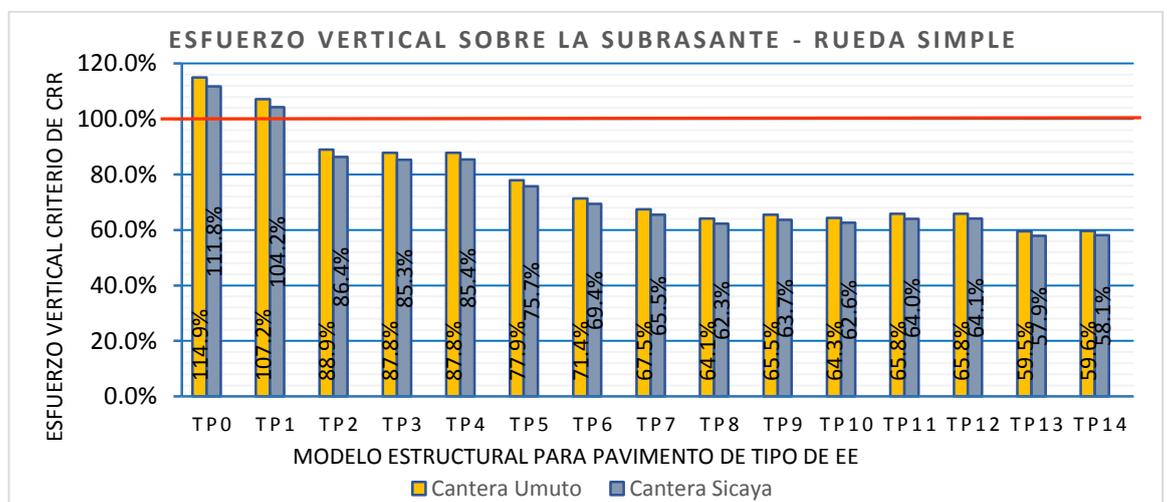
Figura Nro. 26: Contribución en disminución de esfuerzos verticales, Rueda simple



Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

La carga que transmite una rueda simple genera excesivos esfuerzos verticales en los modelos de pavimento propuestos para los Tp0 y Tp1. (ver figura Nro. 27)

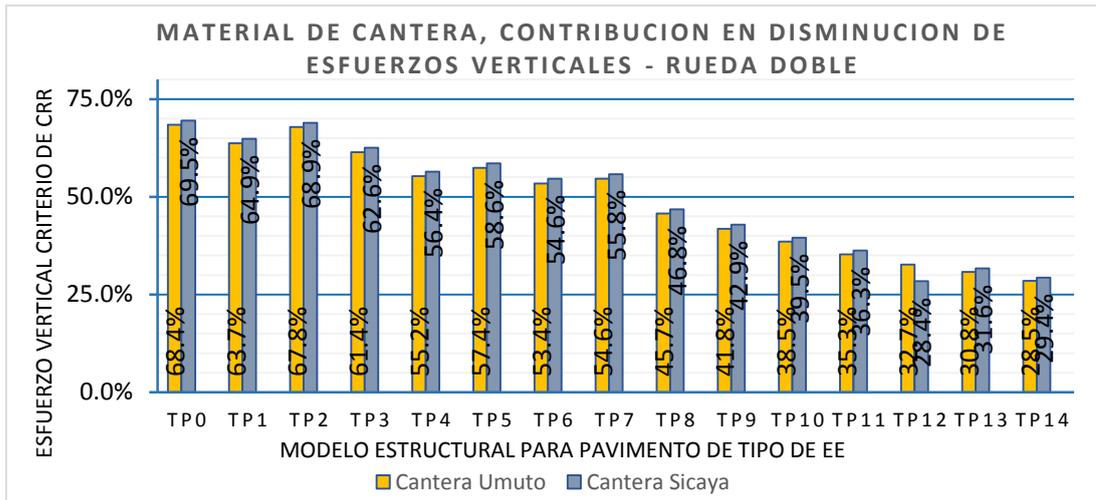
Figura Nro. 27: Criterio CRR de Bélgica, esfuerzo vertical actuante sobre la subrasante. Rueda simple



Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

En el caso de una rueda doble, el material de la cantera Umuto disminuye entre el 68.4% a un 28.5% de los esfuerzos verticales, mientras que el material de la cantera Sicaya disminuye entre el 69.5% al 29.4%, (ver figura Nro. 28).

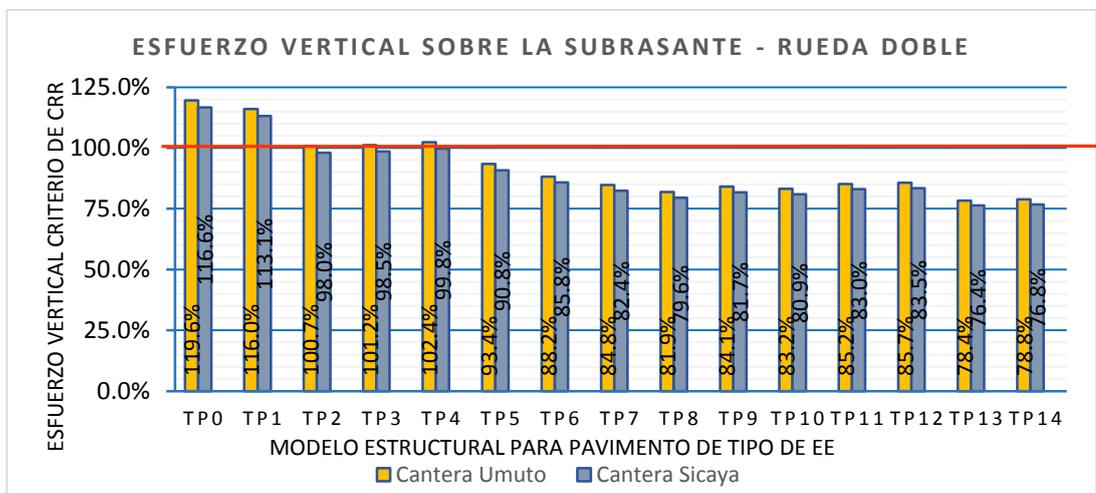
Figura Nro. 28: Contribución en disminución de esfuerzos verticales, Rueda doble



Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

De emplearse el material de la cantera Umuto en los modelos de pavimento propuestos para los T0 al Tp4 presentarían excesivos esfuerzos verticales, en el caso del empleo del material de la cantera Sicaya, los modelos Tp0 y Tp1 presentan excesivos esfuerzos verticales, (ver figura Nro. 29).

Figura Nro. 29: Criterio CRR de Bélgica, esfuerzo vertical actuante sobre la subrasante. Rueda doble



Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

B. Deformación Vertical sobre la subrasante (ϵ_z)

La deformación vertical que se produce en la subrasante varía si se emplea el material de la cantera Umuto en los modelos de pavimento flexible en $-7.37E-04$ a un $-1.17 E-04$ y para el caso de la cantera Sicaya entre un, $-7.08E-04$ a $-1.13E-04$, esto para el caso del análisis de una rueda simple.

Tabla Nro. 30: Resumen del análisis, deformación vertical sobre la subrasante. Material de las canteras Umuto y Sicaya

Tipo de trafico	Deformación Vertical Admisible sobre subrasante, Criterio Shell	Deformación sobre subrasante, rueda simple				Deformación sobre subrasante, rueda doble			
		Cantera Umuto		Cantera Sicaya		Cantera Umuto		Cantera Sicaya	
		Deformación sobre subrasante	(%) Deformación alcanzado	Deformación sobre subrasante	(%) Deformación alcanzado	Deformación sobre subrasante	(%) Deformación alcanzado	Deformación sobre subrasante	(%) Deformación alcanzado
Tp 0	0.001067079	0.000737	69.1%	0.000708	66.4%	-0.0007113	66.7%	-0.00068	64.1%
Tp 1	0.000897303	0.000591	65.9%	0.000568	63.3%	-0.0005983	66.7%	-0.00058	64.1%
Tp 2	0.000789727	-0.00044	56.0%	0.000424	53.7%	-0.0004725	59.8%	-0.00045	57.5%
Tp 3	0.000713599	0.000397	55.7%	0.000382	53.5%	-0.0004348	60.9%	-0.00042	58.5%
Tp 4	0.000664078	-0.00037	56.0%	0.000358	53.9%	-0.0004125	62.1%	-0.00040	59.7%
Tp 5	0.000600062	-0.00030	50.5%	0.000291	48.5%	-0.0003473	57.9%	-0.00033	55.6%
Tp 6	-0.00050459	0.000237	47.1%	0.000228	45.3%	-0.0002831	56.1%	-0.00027	53.9%
Tp 7	0.000444096	0.000200	45.2%	0.000193	43.3%	-0.0002442	55.0%	-0.00025	55.2%
Tp 8	0.000401286	0.000224	56.0%	0.000218	54.3%	-0.0002779	69.3%	-0.00027	67.0%
Tp 9	0.000373439	0.000214	57.5%	0.000208	55.7%	-0.0002671	71.5%	-0.00026	69.3%
Tp 10	0.000353176	0.000154	43.8%	0.000149	42.1%	-0.0001947	55.1%	-0.00019	53.0%
Tp 11	-0.00033744	0.000151	44.8%	0.000146	43.2%	-0.0001911	56.6%	-0.00018	54.5%
Tp 12	0.000314023	0.000141	45.0%	0.000136	43.4%	-0.00018	57.3%	-0.00017	55.2%
Tp 13	0.000296985	0.000121	41.0%	0.000117	39.5%	-0.0001571	52.9%	-0.00015	50.9%
Tp 14	0.000283752	0.000117	41.2%	0.000113	39.7%	-0.0001514	53.4%	-0.00015	51.4%

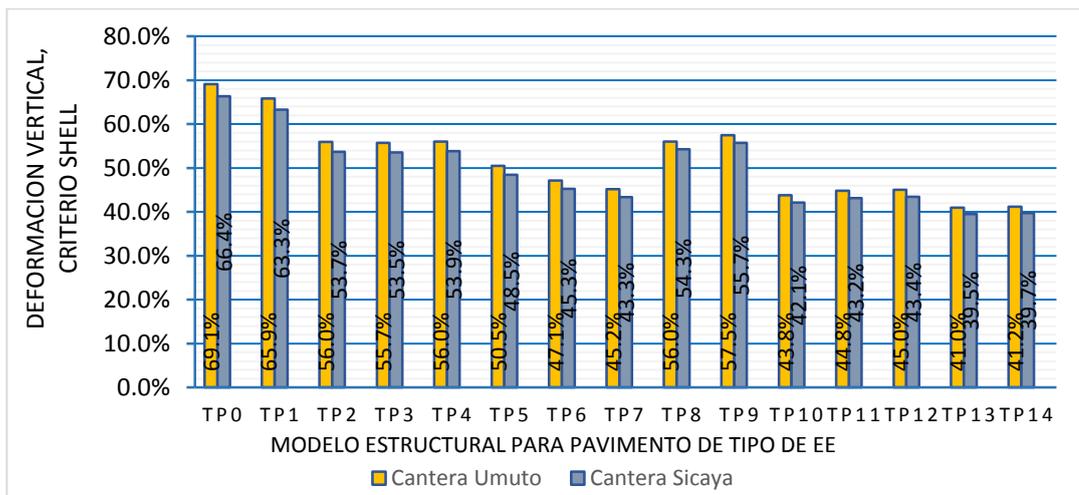
Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con el programa Bisar 3.0

Nota: Resumen Deformación vertical sobre la subrasante, el criterio empleado de máxima deformación vertical es el recomendado por el Criterio Shell.

Del análisis de la rueda doble se observa que de emplearse el material para base de la cantera Umuto se producirían deformaciones verticales que varían entre un $-7.11E-04$ a un $-1.51E-04$ y para el caso de la cantera Sicaya entre los $-6.80E-04$ a $-1.50E-04$.

Con la participación del material de la cantera Umuto, las deformaciones verticales que se producen sobre la subrasante varían entre un 69.1% a un 41.2% del criterio recomendado, mientras que el material de la cantera Sicaya presenta menores deformaciones las cuales varían entre el 66.4% al 39.7%, esto para el caso de una rueda simple, (ver figura Nro. 30).

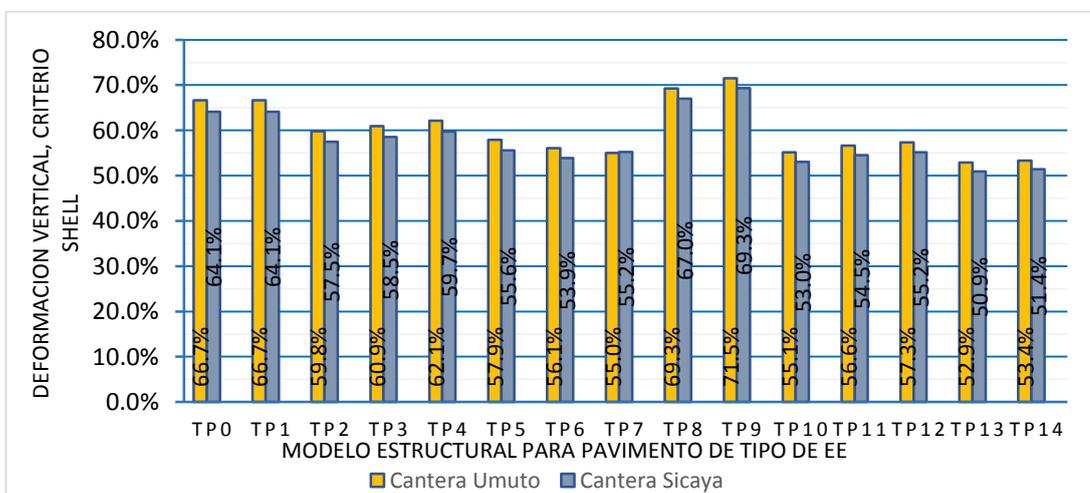
Figura Nro. 30: Deformación vertical sobre la subrasante. Rueda simple



Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

Las deformaciones verticales que produce la rueda doble con el material de la cantera Umuto varían entre el 71.5% al 56.1%, mientras que el material de la cantera Sicaya produce menores deformaciones verticales, las cuales varían entre el 69.3% al 51.4%, (ver figura Nro. 31)

Figura Nro. 31: Deformación vertical sobre la subrasante. Rueda doble



Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

C. Deformación Radial en la interface carpeta asfáltica – base granular.

La deformación radial generada por una rueda simple varía en los modelos de pavimento flexible entre un 2.74E-04 a un 1.68E-04 de emplearse el material de la cantera Umuto, mientras que de emplearse el material de la cantera Sicaya varía entre un 2.42E-04 a un 1.85E-04. Del análisis de la rueda doble se observa que de emplearse el material para base y sub base de la canteras Umuto presentaría deformaciones radiales que varían entre un 2.15E-04 a un 1.76E-04 mientras que el material de la cantera Sicaya varía entre 1.98E-04 a un 1.70E-04 para una rueda doble.

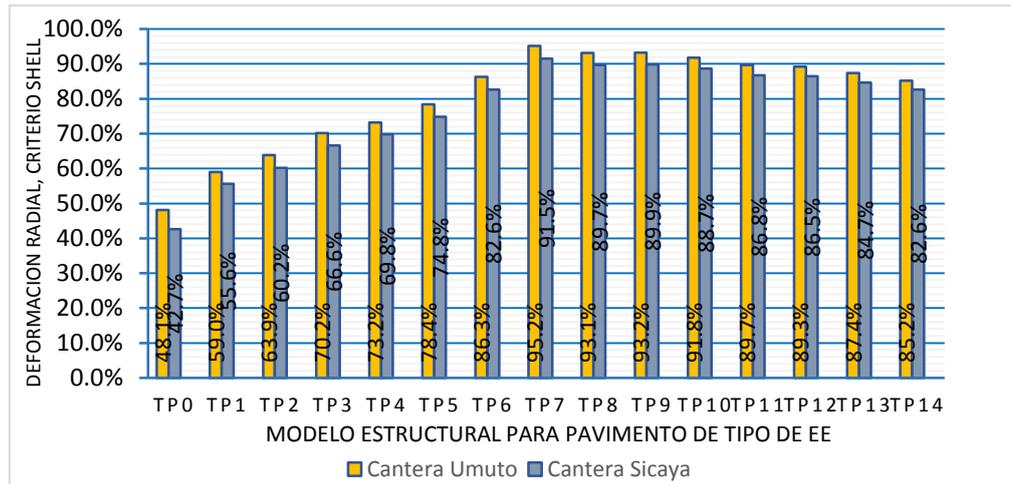
Tabla Nro. 31: Resumen del análisis, deformación radial. Material de las canteras Umuto y Sicaya.

Tipo de trafico	Deformación radial admisible, Criterio Shell	Deformación radial, rueda simple				Deformación radial, rueda doble			
		Cantera Umuto		Cantera Sicaya		Cantera Umuto		Cantera Sicaya	
		Deformación radial en interfase	(%) Deformación alcanzado	Deformación radial en interfase	(%) Deformación alcanzado	Deformación radial en interfase	(%) Deformación alcanzado	Deformación radial en interfase	(%) Deformación alcanzado
Tp 0	5.68E-04	2.74E-04	48.14%	2.42E-04	42.65%	2.15E-04	37.77%	1.98E-04	34.87%
Tp 1	4.95E-04	2.92E-04	59.00%	2.75E-04	55.60%	2.39E-04	48.26%	2.23E-04	45.13%
Tp 2	4.47E-04	2.85E-04	63.89%	2.69E-04	60.24%	2.31E-04	51.62%	2.16E-04	48.31%
Tp 3	4.12E-04	2.89E-04	70.21%	2.74E-04	66.64%	2.42E-04	58.85%	2.28E-04	55.47%
Tp 4	3.89E-04	2.84E-04	73.16%	2.71E-04	69.79%	2.46E-04	63.26%	2.33E-04	59.96%
Tp 5	3.58E-04	2.81E-04	78.42%	2.68E-04	74.82%	2.42E-04	67.43%	2.29E-04	63.94%
Tp 6	3.12E-04	2.69E-04	86.30%	2.58E-04	82.65%	2.37E-04	75.89%	2.26E-04	72.26%
Tp 7	2.82E-04	2.68E-04	95.16%	2.58E-04	91.54%	2.35E-04	83.48%	2.24E-04	79.51%
Tp 8	2.60E-04	2.42E-04	93.15%	2.33E-04	89.69%	2.21E-04	85.22%	2.12E-04	81.64%
Tp 9	2.45E-04	2.29E-04	93.20%	2.21E-04	89.90%	2.13E-04	86.88%	2.05E-04	83.38%
Tp 10	2.35E-04	2.15E-04	91.79%	2.08E-04	88.67%	2.04E-04	86.97%	1.96E-04	83.60%
Tp 11	2.26E-04	2.03E-04	89.71%	1.96E-04	86.79%	1.95E-04	86.35%	1.88E-04	83.17%
Tp 12	2.14E-04	1.91E-04	89.27%	1.85E-04	86.46%	1.86E-04	87.20%	1.80E-04	84.07%
Tp 13	2.04E-04	1.78E-04	87.36%	1.73E-04	84.67%	1.76E-04	86.34%	1.70E-04	83.35%
Tp 14	1.97E-04	1.68E-04	85.17%	1.63E-04	82.64%	1.68E-04	85.28%	1.62E-04	82.38%

Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

La deformaciones radiales producidas por una rueda simple varían entre el 48.1% a un 95.2% de lo recomendado por el criterio Shell con material de la cantera Umuto, en el caso del empleo del material de la cantera Sicaya varía entre un 42.7% a un 91.5%, (ver figura Nro. 32).

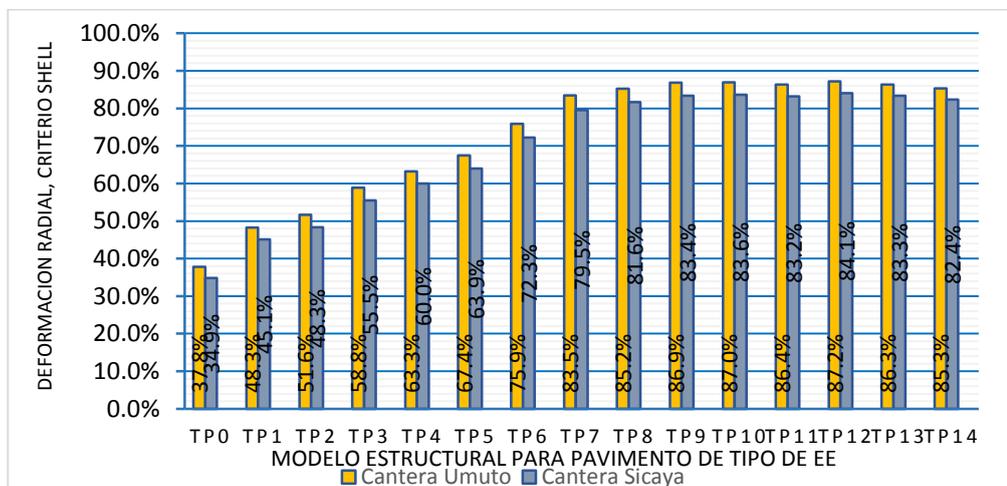
Figura Nro. 32: Criterio SHELL, deformación radial. Rueda simple



Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

La rueda doble produce deformaciones radiales que varían entre el 37.8% a un 87% en el caso de emplearse el material de la cantera Umuto, de emplearse el material de la cantera Sicaya se presentaría deformaciones radiales que varían entre 34.9% a un 83.6% generadas por la carga de una rueda doble, (ver figura Nro. 33).

Figura Nro. 33: Criterio SHELL, deformación radial. Rueda doble



Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

D. Deflexión de la estructura

La deflexión de la estructura varia si se emplea el material de la cantera Umuto en los modelos de pavimento flexible en 0.771 mm para un pavimento flexible propuesto para un Tp0 disminuyendo la deflexión a 0.350 mm para un Tp14 y para el caso de la cantera Sicaya entre un 0.751 mm para un Tp0 a 0.342 mm para un Tp14, esto para el caso del análisis de una rueda simple.

Del análisis de la rueda doble se observa que de emplearse el material para base de la cantera Umuto se producirían deflexiones que varían entre un 0.874 mm para un Tp0 a un 0.436 mm Tp14 y para el caso de la cantera Sicaya entre los 0.817 Tp0 mm a 0.426 mm Tp14.

Tabla Nro. 32: Resumen del resultado, deflexión sobre tipos de estructura. Canteras: Umuto, Sicaya.

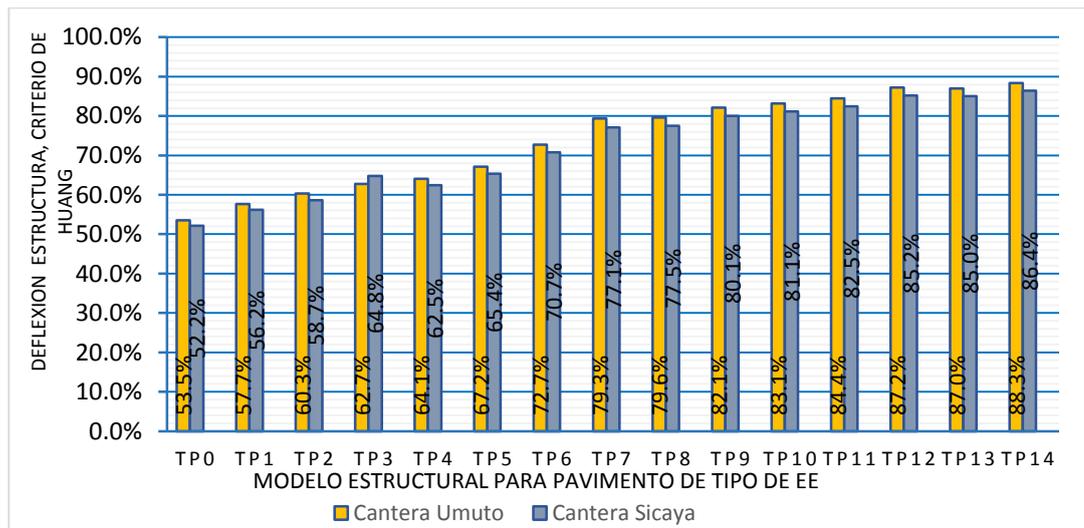
Tipo de trafico	Deflexión total Admisible (mm.)	Deflexión en la estructura, rueda simple						Deflexión en la estructura, rueda doble					
		Cantera Umuto			Cantera Sicaya			Cantera Umuto			Cantera Sicaya		
		Sobre subrasante (mm)	Deflexión total de la estructura (mm.)	(%) deflexión alcanzado	Sobre subrasante (mm)	Deflexión total de la estructura (mm.)	(%) deflexión alcanzado	Sobre subrasante (mm)	Deflexión total de la estructura (mm.)	(%) deflexión alcanzado	Sobre subrasante (mm)	Deflexión total de la estructura (mm.)	(%) deflexión alcanzado
Tp 0	1.440	0.557	0.771	53.5%	0.548	0.751	52.2%	0.703	0.874	60.7%	0.499	0.817	56.7%
Tp 1	1.216	0.494	0.702	57.7%	0.487	0.684	56.2%	0.636	0.806	66.2%	0.627	0.788	64.8%
Tp 2	1.074	0.421	0.648	60.3%	0.414	0.630	58.7%	0.552	0.740	68.9%	0.544	0.722	67.2%
Tp 3	0.973	0.399	0.610	62.7%	0.414	0.630	64.8%	0.528	0.707	72.6%	0.520	0.690	70.9%
Tp 4	0.907	0.387	0.581	64.1%	0.381	0.566	62.5%	0.514	0.683	75.3%	0.507	0.667	73.5%
Tp 5	0.821	0.346	0.552	67.2%	0.340	0.537	65.4%	0.465	0.645	78.5%	0.507	0.667	81.2%
Tp 6	0.694	0.305	0.505	72.7%	0.300	0.491	70.7%	0.415	0.594	85.6%	0.408	0.579	83.5%
Tp 7	0.613	0.279	0.486	79.3%	0.274	0.472	77.1%	0.382	0.569	93.0%	0.376	0.554	90.5%
Tp 8	0.555	0.260	0.442	79.6%	0.256	0.430	77.5%	0.358	0.529	95.3%	0.352	0.515	92.9%

Tp 9	0.517	0.255	0.425	82.1%	0.251	0.414	80.1%	0.351	0.514	99.3%	0.346	0.501	96.9%
Tp 10	0.490	0.246	0.407	83.1%	0.242	0.397	81.1%	0.340	0.497	101.4%	0.335	0.485	98.9%
Tp 11	0.469	0.245	0.396	84.4%	0.241	0.386	82.5%	0.338	0.486	103.7%	0.333	0.475	101.3%
Tp 12	0.437	0.237	0.381	87.2%	0.233	0.372	85.2%	0.328	0.471	107.7%	0.323	0.460	105.3%
Tp 13	0.414	0.219	0.360	87.0%	0.216	0.352	85.0%	0.305	0.446	107.9%	0.300	0.436	105.4%
Tp 14	0.396	0.215	0.350	88.3%	0.212	0.342	86.4%	0.300	0.436	110.1%	0.296	0.426	107.6%

Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

La rueda simple en los modelos de pavimento flexible no produce deflexiones excesivas del criterio recomendado por Huang, (ver figura Nro. 34).

Figura Nro. 34: Criterio Huang, deflexión de la estructura. Rueda simple

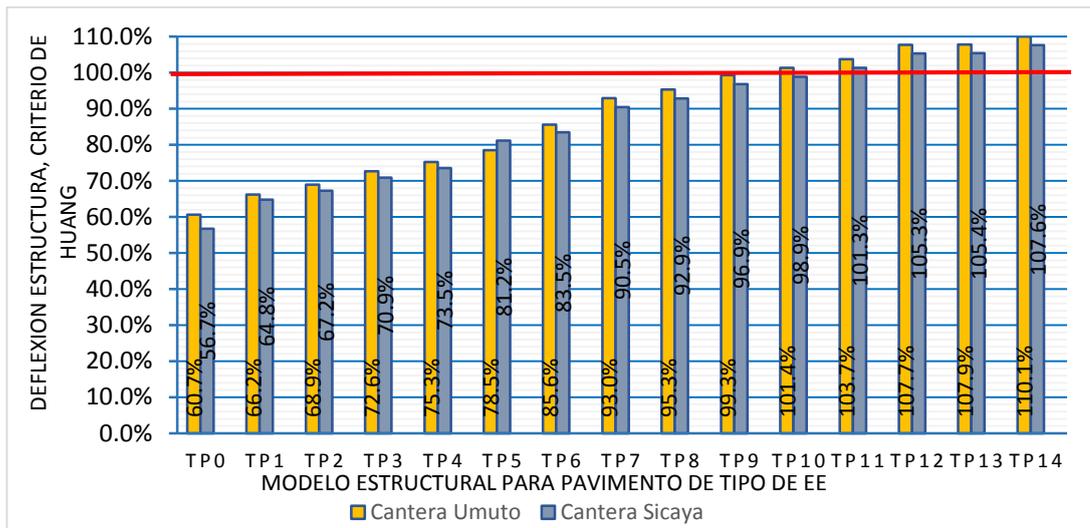


Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

Sin embargo de la evaluación de los modelos estructurales de pavimento flexible, se observa que en los modelos de pavimento flexible para los Tp10, Tp11, Tp12, Tp13 y Tp14 se presentan deflexiones del 101.4%, 103.7%, 107.7%, 107.9%, 101.1% respectivamente en el caso de emplearse el material de la cantera de Umuto.

Mientras que con el empleo del material de la cantera Sicaya los modelos planteado para los Tp11, Tp2, Tp13 y Tp14 presentarían deflexiones del 101.3% 105.3% 105.3% 107.6% de lo recomendado respectivamente, (ver figura Nro. 35)

Figura Nro. 35: Criterio Huang, deflexión de la estructura. Rueda doble



Fuente: Elaboración propia con datos Bisar 3.0

CAPÍTULO V

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

5.1. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

A. HIPÓTESIS GENERAL

A partir de los requerimientos de calidad para base y sub base mencionados en la Norma CE.010 pavimentos urbanos, el material de la cantera Umuto debe de ser empleado solamente como sub base. De emplearse este material como base y sub base en los modelos de pavimento flexible estudiados, los modelos propuestos para los tipos de tráfico Tp0, Tp1, Tp2, Tp3 y Tp4 presentarían excesivos esfuerzos verticales actuantes sobre la subrasante. Además se observó que en los modelos propuestos para los Tp10, Tp11, Tp12, Tp13 y Tp14 se presentarían excesivas deflexiones. El análisis añadió otros resultados relevantes. De emplearse este material en los modelos de pavimento propuestos el tipo de tráfico Tp5, Tp6, Tp7, Tp8 y Tp9, estos no presentarían excesivos esfuerzos verticales, deformaciones ni deflexiones.

Esto se debe a la contribución de la carpeta asfáltica en la disminución de esfuerzos verticales que produce la carga de la rueda del vehículo.

De la evaluación efectuada se observó que en los modelos de pavimento propuestos para el tipo de tráfico de Tp0 al Tp7 las base y sub base contribuye en la disminución de los mayores esfuerzos verticales, los cuales se encuentran entre un 72.2% a 51% de la carga de una rueda simple, mientras que para los Tp8 al Tp14 estas capas disminuyen entre un 41% a un 23.2%, donde las mayores disminuciones son efectuadas por la carpeta asfáltica. En el caso de las cargas de la rueda doble los modelos propuestos para los Tp0 al Tp7 la base y sub base disminuye entre un 73.6% a un 52.2% de los esfuerzos verticales, para los modelos propuestos para los Tp8 al Tp14 este material disminuye entre 42.1% a un 24% del mismo modo las mayores disminuciones de los esfuerzos verticales son efectuados por la carpeta asfáltica. Sin embargo el empleo de este material para la conformación de capas de base en los modelos de pavimentos planteado contradice a lo recomendado por la Norma CE.010, Pavimentos Urbanos, Tabla Nro. 06 Valor relativo de soporte de CBR y la Tabla Nro. 08 requerimientos de agregado fino de base granular.

Por otra parte el material de la cantera Sicaya cumple con el requerimiento para su empleo como sub base, y como base solamente en vías locales y conectoras (para tráfico ligero y medio).

De emplearse el material como sub base y base en los modelos de pavimento flexible propuestos por el manual PT-62, se producirían excesivos esfuerzos verticales sobre la subrasante en modelos de

pavimento flexible propuestos para los TP0, Tp1. El análisis y la evaluación realizada, añaden como dato relevante que en los modelos de pavimento flexible para los Tp10, Tp11, Tp12, Tp13 y Tp14 se producen excesivas deflexiones de la estructura, esto se puede explicar por el valor del CBR del material de esta cantera, que es de 82.8%. Siendo un CBR insuficiente para el empleo en este tipo de estructuras, la Tabla Nro. 06: Valor relativo de soporte de CBR recomienda un mínimo del 100% para vías arteriales y expresas (tráfico pesado). Se observó que los modelos propuestos de pavimento flexible para los Tp2 al Tp9 no presentaron observaciones en las evaluaciones realizadas.

Debido a los análisis y evaluaciones realizados, los modelos de pavimento para los Tp0, Tp1 necesitaran un incremento de espesores para asegurar un adecuado desempeño a lo largo de su tiempo de servicio y considerar la posibilidad de un incremento de espesores en los modelos para los Tp2, Tp3 y Tp4 por poseer esfuerzos comprendidos entre el 98% al 99.8% de lo recomendado.

De esta manera los resultados mencionados confirman la hipótesis general: “Los resultados de la evaluación del material para base y sub base de las canteras de Umuto y Sicaya permitirán diseñar mejores pavimentos flexibles en subrasante de CBR menor al 10% empleando el catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.”

B. HIPÓTESIS ESPECIFICA NRO.01

B.1. CANTERA UMUTO

El material de la cantera Umuto, cumple con los requerimientos de calidad para ser empleado como sub base. No obstante los resultados obtenidos de los estudios de mecánica de suelos muestran que este material no debe de ser usado como material para base. Ya que no cumple el requerimiento mostrado en la Tabla Nro. 06 Valor relativo de soporte CBR. El material alcanza un 74.9% de CBR, siendo el mínimo valor del 80% para vías locales y conectoras y del 100% de CBR para vías principales y expresas. Por lo que el material a recomendación de los requisitos de calidad de la norma solo debe de ser empleado como material que conformara la sub base en estructuras de pavimento flexible.

B.2. CANTERA SICAYA

El material de la cantera Sicaya, cumple con los requerimientos de calidad para ser empleado como sub base, Tabla Nro. 03 y Tabla Nro. 04 mostrados en el capítulo III.

Además el material puede ser empleado como base en vías locales y conectoras, ya cumple con el requerimiento mostrado en la Tabla Nro. 06 Valor relativo de soporte CBR, el material alcanza un 82.8% del valor del CBR, siendo el valor mínimo requerido de CBR del 80% para vías locales y conectoras, no obstante el material de esta cantera no es recomendado para vías principales y expresas ya que se requiere un mínimo del 100% de CBR. Se suma la observación el exceso de

partículas finas en la composición de la muestra, por lo que el material no cumple con la gradación A recomendada.

De lo mencionado el material de la cantera Umuto solo debe de ser empleado como materia para sub base, mientras que, el material de la cantera Sicaya puede ser empleado como material de sub base y base en vías locales y conectoras, luego de una corrección en la combinación de agregados para formar la gradación solicitada.

A partir de los resultados obtenidos la hipótesis específica Nro.01 no es correcta: “El material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya cumple con los requisitos de calidad para ser empleado en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.”

C. HIPÓTESIS ESPECIFICA NRO.02

Para verificar la hipótesis específica Nro. 02 se procedió con el análisis y las evaluaciones del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en los modelos de pavimento flexible propuestos en el catálogo del manual PT-62 del ICG. Mediante el empleo del programa Bisar 3.0 esto para evaluar los diversos estados tensiones de los modelos de la estructura de pavimento flexible, dicho análisis se detalla a continuación.

A. MATERIAL PARA BASE Y SUB BASE, CANTERA UMUTO

a. DISMINUCIÓN DEL ESFUERZO VERTICALES EN LOS MODELOS DE PAVIMENTO

La carpeta asfáltica se encarga de disminuir entre un 16.6% a un 75.1% de los esfuerzos verticales que produce una rueda simple. Mientras que base y sub base conformado con el material de esta cantera disminuye entre un 72.2% para un Tp0 a un 23.2% para un Tp14, de estos esfuerzos.

En el análisis efectuado para la rueda doble, la carpeta asfáltica disminuye entre el 15.2% al 68.3% de esfuerzos verticales, mientras que la base y sub base disminuye entre el 68.4% a un 28.5% de dichos esfuerzos.

Se aprecia una clara disminución del porcentaje en la participación de la base y sub base a medida que los modelos de pavimento son propuestos para vías de mayores ejes equivalentes, esto se debe al incremento gradual de los espesores de la carpeta asfáltica de los modelos de pavimento, a medida que los Ejes Equivalentes son mayores, los espesores de las capas son de mayor espesor. Tabla Nro.33.

Tabla Nro. 33: Disminución de esfuerzo vertical, debido a la base y sub base, Umuto

Modelo Pav. Flexible para EE.	Rueda Simple				Rueda Doble			
	Carpeta asfáltica	Base y Sub Base	Esf. Actuante Subrasante	Disminucion esf. Vertical por Base y Sub Base	Carpeta asfáltica	Base y Sub Base	Esf. Actuante Subrasante	Disminucion esf. Vertical por Base y Sub Base
Tp0	16.6%	72.2%	11.2%	72.2% a un 54%	15.2%	68.4%	16.3%	68.4% a un 55.2%
Tp1	25.3%	65.8%	8.9%		22.8%	63.7%	13.5%	
Tp2	24.4%	69.0%	6.6%		21.7%	67.8%	10.4%	
Tp3	32.9%	61.2%	5.9%		29.0%	61.4%	9.6%	
Tp4	40.5%	54.0%	5.6%		35.7%	55.2%	9.1%	
Tp5	40.0%	55.5%	4.5%	55.5% a un 51.0%	35.1%	57.4%	7.5%	57.4% a un 54.6%
Tp6	46.2%	50.3%	3.5%		40.5%	53.4%	6.1%	
Tp7	46.0%	51.0%	3.0%		40.2%	54.6%	5.2%	
Tp8	56.5%	41.0%	2.6%	41% a un 23.2%	49.7%	45.7%	4.6%	45.7% a un 28.5%
Tp9	60.7%	36.8%	2.4%		53.8%	41.8%	4.4%	
Tp10	64.4%	33.3%	2.3%		57.4%	38.5%	4.1%	
Tp11	67.6%	30.1%	2.2%		60.7%	35.3%	4.1%	
Tp12	70.4%	27.5%	2.1%		63.5%	32.7%	3.8%	
Tp13	72.8%	25.4%	1.8%		65.9%	30.8%	3.3%	
Tp14	75.1%	23.2%	1.7%		68.3%	28.5%	3.2%	

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con el programa Bisar 3.0

Los resultados muestran que la base y sub base desempeñan un papel de mayor importancia en la disminución de esfuerzos verticales, en los modelos de pavimento para los Tp0 al Tp7, la partición de la base y sub base en la disminución de estos esfuerzos varía, entre 72.2% a un 51.0% para una rueda simple y entre 68.4% a un 55.2% para una rueda doble, este resultado es consistente al estudio realizado por (Rondón, 2007) el cual afirma que:

En estructuras flexibles para vías de bajo tráfico la carpeta asfáltica no tienen una función estructural (se construyen capas asfálticas delgadas o de baja rigidez) siendo las capas granulares las que soportan casi en su totalidad las cargas producidas por los vehículos. (Rondón, H. 2007, p.43)

De emplearse el material de la cantera Umuto como base y sub base en estructuras de pavimento flexible, los modelos para los Tp0, Tp1, Tp2, Tp3 y Tp4 presentarían excesivos esfuerzos verticales sobre la subrasante.

b. DEFORMACIÓN VERTICAL ϵ_z SOBRE LA SUBRASANTE

Las deformaciones verticales sobre la subrasante producidas por la carga de una rueda simple varían entre un 69.1% a un 40% del criterio Shell, las cuales comprenden entre $-7.37E-04$ a un $-1.17 E-04$ para los modelos de pavimento propuestos para los Tp0 al Tp14.

Para el caso de una rueda doble, las deformaciones verticales varían entre el 66.7% al 53.4% del criterio Shell, variando entre $-7.11E-04$ un Tp0 a un $-1.51E-04$ para un Tp14.

c. DEFORMACIÓN RADIAL FASE CARPETA ASFÁLTICA, BASE GRANULAR

Varía en los modelos de pavimento flexible entre un $2.74E-04$ a un $1.68E-04$ de emplearse el material de la cantera Umuto, por efectos de la carga de una rueda simple. Del análisis de la rueda doble se observa que de emplearse el material para base y sub base de la canteras Umuto presentaría deformaciones radiales que varían entre un $2.15E-04$ a un $1.76E-04$

d. DEFLEXIÓN DE LA ESTRUCTURA

La carga de una rueda simple produce deflexiones que varían de 0.771 mm para un Tp0 a 0.350 mm para un modelo de Tp14, esta disminución en la deflexión se debe al aumento de los espesores del

pavimento. La carga de la rueda simple no produce deflexiones excesivas. La carga transmitida por una rueda doble produce deflexiones que van desde 0.874 mm para el caso del modelo Tp0, las cuales disminuyen con el aumento de espesores del pavimento llegando a 0.436 mm para un modelo propuesto para un Tp14.

Se observó que se presentan excesivas deflexiones en modelos para los los Tp10, Tp11, Tp12, Tp13 y Tp14 de: 101.4%, 103.7%, 107.7%, 107.9% y 110.1% respectivamente de la deflexión máxima recomendada por Huang.

B. MATERIAL PARA BASE Y SUB BASE, CANTERA SICAYA

a. DISMINUCIÓN DEL ESFUERZO VERTICAL SOBRE LA SUBRASANTE

El material de la cantera Sicaya disminuye los esfuerzos verticales que genera una rueda simple, entre un 73.6% de para un Tp0 a un 24% para un Tp14, mientras que disminuye entre un 69.5% para un Tp0 a un 29.4% para un Tp14 de los esfuerzos verticales generados por una rueda doble

En los modelos de pavimento propuestos para los Tp0 al Tp7, el desempeño de la base y la sub base en la disminución de estos esfuerzos es de gran importancia, ya que varía entre un 73.6% a un 52.2% para una rueda simple y entre 69.5% a un 55.8% para una rueda doble de los esfuerzos verticales que se generan, el desempeño del material de la cantera Sicaya es mucho mejor al de la cantera Umuto.

Este resultado es consistente a lo mencionado por (Rondón, 2007).

La tabla Nro. 34 muestra la participación del material de la cantera Sicaya en la contribución de disminución del esfuerzo vertical generada por una rueda simple y una rueda doble.

Tabla Nro. 34: Disminución de esfuerzo vertical, debido a la base y sub base, Sicaya

Modelo Pav. Flexible para EE.	Rueda Simple				Rueda Doble			
	Carpeta asfáltica	Base y Sub Base	Esf. Actuante Subrasante	Disminución esf. Vertical por Base y Sub Base	Carpeta asfáltica	Base y Sub Base	Esf. Actuante Subrasante	Disminución esf. Vertical por Base y Sub Base
Tp0	15.5%	73.6%	10.9%	73.6% a un 55.3%	14.6%	69.5%	15.9%	69.5% a un 56.4%
Tp1	24.4%	67.0%	8.7%		22.0%	64.9%	13.2%	
Tp2	23.4%	70.2%	6.4%		20.9%	68.9%	10.2%	
Tp3	31.8%	62.5%	5.8%		28.1%	62.6%	9.3%	
Tp4	39.3%	55.3%	5.4%		34.7%	56.4%	8.8%	
Tp5	38.8%	56.8%	4.4%	56.8% a un 52.2%	34.1%	58.6%	7.3%	58.6% a un 55.8%
Tp6	45.1%	51.5%	3.4%		39.5%	54.6%	5.9%	
Tp7	44.9%	52.2%	2.9%		39.2%	55.8%	5.0%	
Tp8	55.4%	42.1%	2.5%	42.1% a un 24%	48.8%	46.8%	4.4%	46.8% a un 29.4%
Tp9	59.7%	37.9%	2.4%		52.9%	42.9%	4.3%	
Tp10	63.4%	34.4%	2.2%		56.4%	39.5%	4.0%	
Tp11	66.7%	31.1%	2.2%		59.8%	36.3%	4.0%	
Tp12	69.6%	28.4%	2.0%		67.9%	28.4%	3.7%	
Tp13	72.0%	26.2%	1.8%		65.1%	31.6%	3.2%	
Tp14	74.3%	24.0%	1.7%		67.5%	29.4%	3.1%	

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con el programa Bisar 3.0

La evaluación mostro que los modelos propuestos para los modelos de pavimento flexible para el tipo de tráfico de Tp0 y Tp1 presentan excesivos esfuerzos verticales con respecto al criterio de la CRR de Bélgica. Por lo que estos modelos deberían de ser mejorados con un aumento de espesores.

b. DEFORMACIÓN VERTICAL ϵ_z SOBRE LA SUBRASANTE

Las deformaciones para el caso de una rueda simple varían entre el 28.5% al 20.3% del criterio Shell, siendo para un Tp0 la deformación vertical de $-7.08E-04$ disminuyendo a $-1.13E-04$ para un Tp14. La

rueda doble produce menores deformaciones verticales, las cuales varían entre el 22.3% al 12.2% del criterio recomendado, las cuales varían para un Tp0 de $-6.80E-04$. Disminuyendo a $-1.50E-04$ para un Tp14.

c. DEFORMACIÓN RADIAL FASE CARPETA ASFÁLTICA, BASE GRANULAR

La rueda simple produce deformaciones radiales que varían entre el 42.65% al 82.64% (un $2.42E-04$ a un $1.85E-04$.) del criterio recomendado mientras que para la rueda doble se producen deformaciones radiales que varían entre el 34.87% al 82.38% ($1.98E-04$ a un $1.70E-04$) para los modelos de pavimento propuestos para los tipo de trafico comprendidos para los Tp0 al Tp14.

d. DEFLEXIÓN DE LA ESTRUCTURA

Los resultados del análisis muestran que se producirían deflexiones en la estructura las cuales variarían entre 0.751 mm en el caso de un modelo para un Tp0 a 0.342 mm para un T14 generadas por la carga de una rueda simple. Mientras que las generadas por una rueda doble varían de 0.817 mm para un Tp0 disminuyendo a un 0.426 mm para un Tp14.

Además se observó que se presentan deflexiones excesivas en el modelo de pavimento propuesto para los Tp11, Tp12, Tp13 y Tp14 los cuales presentarían deflexiones del 101.3%, 105.3%, 105.4% y 107.6% de lo recomendado por el criterio de Huang.

C. DESEMPEÑO ESTRUCTURAL DEL MATERIAL PARA BASE Y SUB BASE DE LAS CANTERAS UMUTO Y SICAYA

Los resultados de la evaluación de desempeño estructural del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en los modelos de pavimento flexible son mostrados en la Tabla Nro. 35

Tabla Nro. 35: Resumen de observaciones realizadas

	Modelo Pav. Flexible para EE.	Cantera Umuto			Cantera Sicaya		
		Rueda Simple	Rueda Doble	Observacion	Rueda Simple	Rueda Doble	Esf. Actuante Subrasante
Modelo de pavimento flexible propuesto para tipo de EE	Tp0	114.90%	119.60%	Excesivo esfuerzo vertical sobre la subrasante	111.80%	116.60%	Excesivo esfuerzo vertical sobre la subrasante
	Tp1	107.20%	116.00%	Excesivo esfuerzo vertical sobre la subrasante	104.20%	113.10%	Excesivo esfuerzo vertical sobre la subrasante
	Tp2		100.70%	Excesivo esfuerzo vertical sobre la subrasante			
	Tp3		101.20%	Excesivo esfuerzo vertical sobre la subrasante			
	Tp4		102.40%	Excesivo esfuerzo vertical sobre la subrasante			
	Tp5						
	Tp6						
	Tp7						
	Tp8						
	Tp9						
	Tp10		101.40%	Excesiva deflexion de la estructura			
	Tp11		103.70%	Excesiva deflexion de la estructura		101.30%	Excesiva deflexion de la estructura
	Tp12		107.70%	Excesiva deflexion de la estructura		105.30%	Excesiva deflexion de la estructura
	Tp13		107.90%	Excesiva deflexion de la estructura		105.40%	Excesiva deflexion de la estructura
	Tp14		110.10%	Excesiva deflexion de la estructura		107.60%	Excesiva deflexion de la estructura

Excesivo esfuerzo vertical sobre la subrasante, Criterio CRR

Excesiva deflexión de la estructura, Criterio de Huang.



Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con el programa Bisar 3.0

De las observaciones realizadas del análisis y evaluaciones del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya. El material de la cantera Umuto requiere un aumento de espesores en

los modelos para los Tp0 al Tp4 por presentar excesivos esfuerzos verticales, en los modelos para los Tp10 al Tp14 se presentan excesivas deflexiones. En los modelos para los Tp5 al Tp9 no se presentan observaciones.

De emplearse el material de la cantera Sicaya, se requiere un aumento de espesores en los modelos de pavimento flexible propuestos para los Tp0 y Tp1 además no la evaluación revelo que este material no es recomendado en los modelos para pavimento para los Tp11, Tp12, Tp13 y Tp14 ya que se producen excesivas deflexiones. Los modelos para los Tp2 al Tp10 no presentan observaciones en el análisis efectuado.

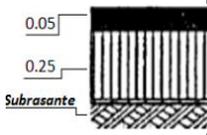
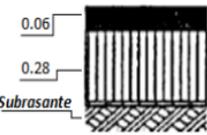
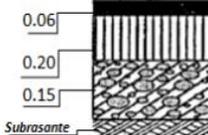
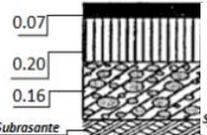
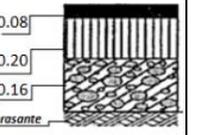
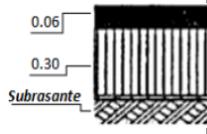
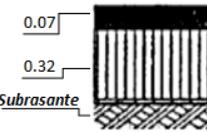
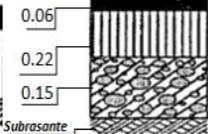
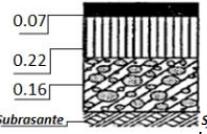
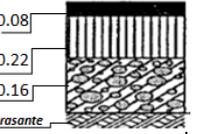
A partir de los resultados obtenidos se concluye que la hipótesis específica Nro.02 no es correcta: "El material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya posee un adecuado desempeño estructural en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.

5.2. IMPLICACIÓN PRÁCTICAS

A partir de los resultados, se observa que en los modelos propuestos de pavimento flexible para los Tp0 al Tp7 dependen en gran medida de la calidad y el espesores de las capas de la base y sub base en la estructura del pavimento, los cuales tienen una mayor participación en la disminución de los esfuerzos verticales en la estructura del pavimento que la carpeta asfáltica. Se observó que para el caso de la cantera Sicaya, los modelos de pavimento

propuesto para el Tp0 y Tp1 requieren un incremento de espesores si la vía presenta tránsito de vehículos pesados y se debe de considerar un incremento de espesores en los modelos para los Tp2, Tp3 y Tp4, esto con la finalidad de disminuir dichos esfuerzos cercanos a lo recomendado por el criterio de la CRR; en la Tabla Nro36 se proponen los incrementos que se deben de realizar.

Tabla Nro. 36: Propuesta de solución para los modelos de pavimento observados. Material cantera Sicaya.

	Tp0	Tp1	Tp2	Tp3	Tp4
Modelos propuestos catálogo de estructuras de pavimento flexible					
Incremento de espesores	Carpeta asfáltica: 1 cm Base: 5 cm. .	Carpeta asfáltica: 1 cm Base: 4 cm. .	Base: 2 cm. .	Base: 2 cm. .	Base: 2 cm. .
Modelos propuestos a partir de los análisis efectuados					

Fuente: Elaboración propia a partir de los resultados obtenidos con el programa Bisar 3.0

Nota: Las láminas de comportamiento de los modelos de pavimento propuestos se encuentran en la parte de anexo Nro. 06.

A esto se suma el que material de la cantera Sicaya no debe de ser empleado en los modelos de pavimento propuestos para un tipo de tráfico propio de los Tp11, Tp12, Tp13 y T14 ya que se producirían excesivas deflexiones en la estructura.

5.3. LIMITACIONES

A. Características de la muestra

La muestra representativa del material de las canteras estudiadas, son producto de un proceso de mezcla de agregados, este proceso es realizado con la finalidad de obtener la gradación A, la cual recomienda la norma, las

características mecánicas del material de cantera pueden variar si se modifica los porcentajes de la mezcla de componentes.

B. Valor del módulo de la carpeta asfáltica

Para la realización de la evaluación del desempeño de los modelos de pavimento con la contribución del material de las canteras, se requirió emplear el módulo de la carpeta asfáltica, en el país no se realizaron estudios que determinen un valor específico. Esta limitación fue resuelta empleando el módulo de la carpeta asfáltica propuesto por INVIAS Colombia para temperaturas comprendidas entre los 20°C a los 27°C.

C. Valores de los módulos Resiliente

Para obtener un módulo Resiliente de la subrasante, la base y sub base el material de estas canteras analizadas debe de ser sometido a un ensayo con un equipo triaxial cíclico, lamentablemente en el país se cuentan con escasos equipos para este análisis y los costos por realización de ensayo son elevados, esta limitación fue resuelta empleando la ecuación de correlación del CBR con el Modulo Resiliente propuesta en la Guía AASHTO 2002.

5.4. APOORTE EN EL DISEÑO DE ESTRUCTURAS DE PAVIMENTO FLEXIBLE AASHTO 93

En método racional empleado para la evaluación del desempeño de las capas del pavimento mediante el programa Bisar 3.0 permitio cuantificar el grado de participación de cada componente, este método es recomendable en la etapa de diseño y se sugiere efectuarla de manera conjunta con un método de

diseño empírico, como es el caso del método AASHTO 93 ya que cuantifica la participación de los diversas capas del pavimento frente a la acción de las cargas vehiculares.

En los modelos de pavimento flexible evaluados con la participación de los materiales para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya se identificó modelos que transmiten excesivos esfuerzos verticales a la subrasante (modelos de pavimento para bajo volumen de transito) y modelos con exceso de deflexión en para el tipo de trafico superior a un Tp10 y Tp11.

De esta manera el aporte de la investigación se resume en:

- En los modelos de Pavimento flexible de subrasante regular y de tipo de tráfico comprendido para los Tp0 a un Tp7, la mayor contribución en disminución de esfuerzos verticales sobre la estructura la realiza las capas que constituyen la base y sub base, dejando en segundo lugar a la carpeta asfáltica.
- Los modelos de pavimento propuestos mostrados en el manual PT-62 del ICG, para el tipo de tráfico de Tp0, Tp1 en una subrasante regular requieren de un aumento de espesores esto con la finalidad de evitar deformaciones a nivel de la subrasante por los excesivos esfuerzos verticales, si la vía presenta la demanda de vehículos pesados además se debe de considerar un incremento de espesores en los modelos propuestos para los Tp2, Tp3 y Tp4 por encontrarse los esfuerzos cercanos al 100% del esfuerzo recomendado en la subrasante.

- No se recomienda el empleo del material de la cantera Sicaya en los modelos de pavimento propuesto para un tipo de tráfico superior a un Tp11 por un exceso de deflexiones.
- La norma CE.010 que recomienda el empleo de materiales de CBR del 100% en vías Expresa y Arteriales por lo que el material de estas canteras no deben de emplearse en este tipo de vías.
- Se muestra el comportamiento de los estados tensionales de los modelos de pavimento con la intervención del material de las canteras evaluadas. De esta forma al considerar estos resultados en la etapa de diseño del pavimento flexible, se podrán diseñar mejores paquetes estructurales con el empleo de estos materiales.

5.5. FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

El análisis del comportamiento de la estructura de pavimento se encuentra en una constante evolución debido a los avances tecnológicos que se dan día a día, nuevos métodos de evaluación de los materiales que componen las capas del pavimento ofrecen valores de mayor precisión, los que reducen significativamente los errores en la etapa de diseño. En los próximos años nuevas tendencias de diseño se popularizaran debido a su mayor grado de precisión y confiabilidad, métodos de diseño que unirán las filosofías de diseño que por décadas se encontraban divididas, hablamos de los métodos de diseño empíricos y los métodos racionales o llamados también mecanísticos. Como el propuesto en la Guía de Diseño Mecanístico – Empírico de Pavimentos propuesto por el comité ejecutivo 2007/2008 del AASHTO. El cual busca también predecir el comportamiento del pavimento

evitando así la aparición de fallas. De esta manera y con la contribución de diversas investigaciones se podrá conocer con un mayor grado de precisión el comportamiento de una estructura de pavimento, y quizás un día se pueda negar la afirmación propuesta por Alfonso Rico:

“Se dice que diseñar un pavimento es un arte; el arte de utilizar materiales que no conocemos completamente, en formas que no podemos analizar con precisión, para que soporten cargas que no sabemos predecir, de tal forma que nadie sospeche nuestra ignorancia.

Y es que, “de esa estructura compleja a la que llamamos pavimento, que construimos muchos en muchas variedades, con distintos materiales, para muy diferentes usos, en muy diferentes terrenos y que usamos en todo momento, a fondo, lo ignoramos todo”.

Así escribió el Maestro Alfonso Rico en la Decimocuarta Conferencia Nabor Carrillo.

CONCLUSIONES

1. Los resultados de la evaluación concluyen que el material de la cantera Sicaya posee un mejor desempeño en la estructura del pavimento, este cumple con los requerimientos de la Norma CE.010 para su empleo como sub base, y como base solamente en vías locales y conectoras de un tipo de tráfico menor a un Tp11 (12'500,000 EE). El análisis mostro que se debe de incrementar espesores en los modelos de pavimento propuestos para los TP0 y Tp1.
2. De la evaluación del material para su base y sub base en función de los requisitos de calidad, Norma CE.010
 - a) El material de la cantera Umuto cumple con los requisitos para ser empleado solamente como sub base. Alcanza un 74.90% de CBR, siendo el mínimo valor del 80% para su empleo como base.
 - b) El material de la cantera Sicaya cumple con los requisitos para su empleo tanto como sub base y como base en vías locales y conectoras. Este material alcanza un 82.80% del valor del CBR.
3. Evaluación del desempeño estructural en modelos de pavimentos flexibles en subrasante de CBR menor al 10%.
 - a) De emplearse el material de la cantera Umuto, en los modelos de pavimento, los tipos de tráfico Tp0 al Tp4 presentarían excesivos esfuerzos

verticales sobre la subrasante del criterio recomendado por CRR de Bélgica y deflexiones excesivas en los modelos de pavimento propuestos para los tipos de tráfico del Tp10 al Tp14 del criterio propuesto por Huang, las deformaciones verticales y radiales son menores a lo recomendado por el criterio Shell.

- b) Con el empleo del material de la cantera Sicaya se producirían excesivos esfuerzos verticales del criterio recomendado por la CRR de Bélgica en la subrasante, para los modelos propuestos para los Tp0 y Tp1. En los modelos de pavimento propuesto para los Tp11 al Tp14 se producen excesivas deflexiones que exceden a lo recomendado por el criterio propuesto por Huang, las deformaciones verticales y radiales son menores a lo recomendado por el criterio Shell.

RECOMENDACIONES

1. Para el empleo del material de la cantera Sicaya se debe de realizar un ajuste en la gradación del material, para que se encuentre dentro del entorno de la Gradación A, disminuyendo un 18% del material pasante de la malla Nro. 200 del resultado obtenido en el estudio de mecánica de suelos.
2. Los modelos de pavimento diseñados deben de ser evaluados y analizados con la aplicación del método racional con el empleo del programa software Bisar 3.0 esto con la finalidad de poder optimizar el diseño considerando algún posible incremento de espesores en el modelo de pavimento.
3. Respetar los espesores de las capas que conforman la base y sub base y su grado de compactación, esto para asegurar un adecuado desempeño de estas capas de la estructura del pavimento

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Chang, Carlos. (2012). *“Diseño de Pavimentos: Un Enfoque Integral”*. En Pavimentos Un Enfoque Integral (9-10). Lima - Perú: Fondo Editorial ICG.
- (2) Gutierrez, J. (2007). *Modelación geotécnica de pavimentos flexibles con fines de análisis y diseño en el Perú*. Universidad Nacional de Ingeniería. Lima, Perú.
- (3) Higuera, C. (2007). *Comportamiento de estados tensionales de una estructura de pavimento*. Escuela de Transporte y Vías, UPTC, Colombia (versión consultada sin numeración en las páginas)
- (4) Higuera, C. H. (2010). *Nociones sobre métodos de diseño de estructuras de pavimentos para carreteras*. Tunja, Bocaya - Colombia: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- (5) Higuera, F. (2007). *Definición moderna de los parámetros para el diseño de pavimentos (Tesis de Grado)*. Escuela Politécnica del Ejército. Sangolqui, Ecuador
- (6) Huang, Y. (2004). *Pavement Analysis and Design*. Pearson Prentice Hall. USA.
- (7) Instituto de la Construcción y Gerencia. (2015). *Componentes de la*

- Infraestructura del Camino*. En PT-62(20). Lima - Perú: Fondo Editorial ICG.
- (8) Instituto Nacional de Vías. (1998). Normas de Ensayo de Materiales para Carreteras, Tomo I: Suelos, Norma I.N.V.E - 156 "Módulo Resiliente de Suelos de Subrasante"
- (9) Juárez, E. Rico, A. (2011), *Mecánica de suelos*. Editorial Milusa. Balderas, México.
- (10) Manual de carreteras suelos, geología y pavimentos sección: suelos y pavimentos (4ta ed.). 2015. Perú. Fondo editorial ICG.
- (11) Martínez, R. (2016). *Procedimiento para el diseño estructural de pavimentos flexibles rehabilitados en Cuba con el empleo de bases recicladas utilizando ligantes asfálticos* (Tesis de grado). La Habana, Cuba.
- (12) Minaya, S. Ordoñez, A. (2001). *Manual de laboratorio ensayos para pavimentos volumen I*. Universidad Nacional de Ingeniería.
- (13) Moll, R. (2016). *Procedimiento para el diseño estructural de pavimentos flexibles rehabilitados en Cuba con el empleo de bases recicladas utilizando ligantes asfálticos* (Tesis de grado). La Habana, Cuba.
- (14) Reyes, L. F. Rondon, H. A. (2007). *Metodologías de diseño de pavimentos flexibles; tendencias, alcances y limitaciones. Ciencia e Ingeniería Neogranadina, Vol. 17-2, pp. 41-65*.
- (15) Rivas, M (1998). *Estudio de los materiales granulares utilizados en capas de base y sub base en carreteras* (Tesis doctoral). Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- (16) Rodríguez, E, (2009). *Cálculo del índice de condición del pavimento flexible en la av. Luis Montero distrito de Castilla*. Universidad de Piura. Piura, Perú
- (17) Rondón, H. Reyes, F. (2007). Metodologías de diseño de pavimentos

flexibles: Tendencias, alcances y limitaciones. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, Vol. 17-2, (p. 41-65)

PAGINAS WEB

1. proviasnac.gob.pe/frmContenido.aspx?IdArchivo=427
2. <http://paveing.blogspot.pe/2014/11/metodo-de-los-espesores-equivalentes-Odemark.html>
3. www.biblioteca.udep.edu.pe/bibvirudep/tesis/.../1_102_181_62_939.pdf
4. civilgeeks.com/.../manual-de-tecnicas-de-rehabilitacion-de-pavimentos
5. www.vialidad.gov.ar/licitaciones/archivo.php?id=44
6. www.senamhi.gob.pe
7. Manual de rehabilitación de pavimentos, publicado en la página web www.carreteros.org.
8. <http://giv.com.co/invias2013/450%20MEZCLAS%20ASFALTICAS%20EN%20CALIENTE%20DE%20GRADACION%20CONTINUA.pdf>
9. ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-754-07.pdf

ANEXO 01

MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO: “ANÁLISIS COMPARATIVO DEL MATERIAL PARA BASE Y SUB BASE DE LAS CANTERAS UMUTO Y SICAYA EN PAVIMENTO FLEXIBLE DE SUBRASANTE DE CBR MENOR AL 10% HUANCAYO 2017”

Problemas	Objetivos	Marco Teórico	Hipótesis	Variables	Metodología
<p>Problema general</p> <p>¿Cuáles son los resultados de la evaluación del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG?</p> <p>Problemas específicos</p> <p>1. ¿Qué requisitos de calidad cumple el material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya para su empleo en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG?</p> <p>2. ¿Cuáles son los resultados del desempeño estructural del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG?</p>	<p>Objetivo general</p> <p>Analizar los resultados de la evaluación del material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% mostrado en el catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.</p> <p>Objetivos específicos</p> <p>1. Evaluar si el material para base y sub base de las canteras de Umuto y Sicaya cumple con los requisitos de calidad para su empleo en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% mostrado en el catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.</p> <p>2. Evaluar si el material para base y sub base de las canteras de Umuto y Sicaya posee un adecuado desempeño estructural en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% mostrado en el catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.</p>	<p>Investigaciones en el Perú</p> <ul style="list-style-type: none"> - Daniel Rodríguez Velasquez, (2009). Cálculo Del Índice De Condición Del Pavimento Flexible En La Av. Luis Montero Distrito De Castilla. Piura - José Wilfredo Gutiérrez Lazares, (2007). Modelación Geotécnica De Pavimentos Flexibles Con Fines De Análisis Y Diseño En El Perú. Lima. <p>Investigaciones en el Extranjero</p> <ul style="list-style-type: none"> - Manuel Rivas Cervera (1998) Estudio De Los Materiales Granulares Utilizados En Capas De Base Y Sub Base En Carreteras. Madrid, España. - Martínez, R. (2016). Procedimiento para el diseño estructural de pavimentos flexibles rehabilitados en Cuba con el empleo de bases recicladas utilizando ligantes asfálticos (Tesis de grado). La Habana, Cuba. - Higuera, F. (2007). Definición moderna de los parámetros para el diseño de pavimentos (Tesis de Grado). Escuela Politécnica del Ejército. Sangolqui, Ecuador - Carlos Hernando Higuera (2012). Comportamiento De Los Estados Tensionales De Una Estructura De Pavimento Flexible. Colombia. 	<p>Hipótesis general</p> <p>Con el empleo del material de la cantera Sicaya se podrá diseñar mejores modelos de pavimentos flexibles en subrasante de CBR menor al 10% empleando el catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.</p> <p>Hipótesis específicas</p> <p>1. El material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya cumple con los requisitos de calidad para ser empleado en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.</p> <p>2. El material para base y sub base de las canteras Umuto y Sicaya posee un adecuado desempeño estructural en los modelos de pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10% del catálogo de estructuras pavimento flexible del manual PT-62 del ICG.</p>	<p>Variable Independiente:</p> <p>Material para base y sub base</p> <p>Dimensiones:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Estudios de mecánica de suelos. - Estados tensionales <p>Variable Dependiente:</p> <p>Pavimentos flexibles de subrasante de CBR menor al 10%</p> <p>Dimensiones:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Requisitos de calidad - Desempeño estructural. 	<p>Tipo: Aplicada</p> <p>Nivel: Descriptivo, exploratorio y explicativo.</p> <p>Diseño: Experimental.</p> <div style="text-align: center;"> <pre> graph TD M --> O1 M --> O2 O1 <--> r O2 </pre> <p>Donde:</p> <p>M = Muestra</p> <p>O₁, Variable 1</p> <p>O₂, Variable 2</p> <p>r = relación entre las dos variables.</p> </div> <p>Población y Muestra:</p> <p>Población: Canteras para base y sub base del valle del Mantaro de la regio Junin.</p> <p>Muestra: Intencionada, canteras Umuto y Sicaya.</p> <p>Técnica e Instrumento</p> <p>Observación: Resultados del estudio de mecánica de suelos.</p> <p>Muestras: Muestra representativa del material de cantera.</p>