

# **UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN**

**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA**

**Escuela Profesional de Ingeniería Civil**



*Una Institución Adventista*

**Aplicación de la tecnología de pavimentos de losas cortas TCP  
en la vía de acceso de la Universidad Peruana Unión, distrito de  
Juliaca – Puno**

Tesis para obtener el Título Profesional de Ingeniero Civil

Por:

Wildo Alexis Supo Gutierrez

Asesor:

Ing. Herson Duberly Pari Cusi

**Juliaca, diciembre de 2021**

## DECLARACIÓN JURADA DE AUTORÍA DEL INFORME DE TESIS

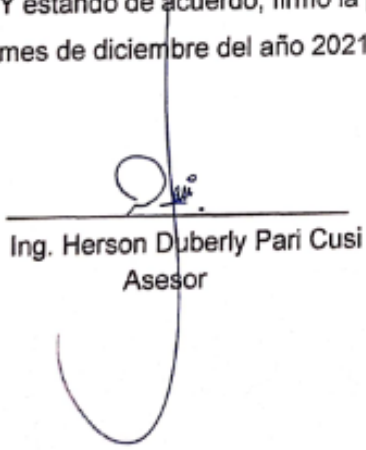
Herson Duberly Pari Cusi, de la Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Escuela Profesional de Ingeniería Civil, de la Universidad Peruana Unión.

### DECLARO:

Que el presente informe de investigación titulado: **"APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PAVIMENTOS DE LOSAS CORTAS TCP EN LA VÍA DE ACCESO DE LA UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN, DISTRITO DE JULIACA – PUNO"** constituye la memoria que presenta el Bachiller **Wildo Alexis Supo Gutierrez** para obtener el título de Profesional de Ingeniero Civil, cuya tesis ha sido realizada en la Universidad Peruana Unión bajo mi dirección.

Las opiniones y declaraciones en este informe son de entera responsabilidad del autor, sin comprometer a la institución.

Y estando de acuerdo, firmo la presente declaración en Juliaca, a los 15 días del mes de diciembre del año 2021

  
Ing. Herson Duberly Pari Cusi  
Asesor



145

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

En Puno, Juliaca, Villa Chullunqulani, a 15 día(s) del mes de diciembre del año 2021, siendo las 11:00 horas, se reunieron en el Salón de Grados y Títulos de la Universidad Peruana Unión, Filial Juliaca, bajo la dirección del Señor Presidente del jurado: Ing. Ruben Fitzgerald Sosa Aguirre secretario: Mg. Efraim Velasquez Mamani miembros: Ing. Juana Beatriz Aguirre Pari - Ing. Rina Yampara Ticona y los demás y el asesor Ing. Herson Duberly Pari Cusi

con el propósito de administrar el acto académico de sustentación de la tesis titulada: "Aplicación de la Tecnología de pavimentos de losas cortas TCP en la vía de acceso de la Universidad Peruana Unión, distrito de Juliaca - Puno"

de el(los)/la(las) bachiller(es): a) Wildo Alexis Supo Gutierrez b)

Ingeniero Civil (Nombre del Título Profesional)

conducente a la obtención del título profesional de

con mención en

El Presidente inició el acto académico de sustentación invitando al (los)/a(la)(las) candidato(a)s hacer uso del tiempo determinado para su exposición. Concluida la exposición, el Presidente invitó a los demás miembros del jurado a efectuar las preguntas, y aclaraciones pertinentes, las cuales fueron absueltas por el(los)/la(las) candidato(a)s. Luego, se produjo un receso para las deliberaciones y la emisión del dictamen del jurado.

Posteriormente, el jurado procedió a dejar constancia escrita sobre la evaluación en la presente acta, con el dictamen siguiente:

Candidato (a): Wildo Alexis Supo Gutierrez

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	
Aprobado	17	B+	Muy Bueno	Sobresaliente

Candidato (b):

CALIFICACIÓN	ESCALAS			Mérito
	Vigesimal	Literal	Cualitativa	

(\*) Ver parte posterior

Finalmente, el Presidente del jurado invitó al(los)/a(la)(las) candidato(a)s a ponerse de pie, para recibir la evaluación final y concluir el acto académico de sustentación procediéndose a registrar las firmas respectivas.

  
 Presidente  
  
 Asesor  
  
 Candidato(a) (a)

  
 Miembro

  
 Secretario  
  
 Miembro  
 Candidato(a) (b)

## **DEDICATORIA**

A Dios por brindarme su mano cada día, hasta este momento y los días venideros.

A mis padres, Juan Supo Callo y Clotilde Gutiérrez Miranda, por todo el apoyo brindado en mi formación profesional.

A mis hermanas Jamileth Supo y en paz descansen Ivonne Supo, quienes me motivan a ser un mejor ser humano.

## **AGRADECIMIENTO**

A Dios por acompañarme a largo de mi vida, y porque siempre cumple sus promesas en nuestras vidas.

A mis padres, quienes fueron mi mayor sustento y motivación para lograr todas mis metas y darme una formación cristiana desde mi niñez.

A mi asesor Ing. Herson Duberly Pari Cusi, por su apoyo incondicional en esta etapa, por el tiempo brindado y la motivación en mi crecimiento personal.

## INDICE GENERAL

DEDICATORIA.....	iv
AGRADECIMIENTO.....	v
INDICE GENERAL .....	vi
INDICE DE TABLAS.....	x
INDICE DE FIGURAS .....	xii
RESUMEN .....	xiv
ABSTRACT.....	xv
Capítulo I. El problema.....	16
1.1 Planteamiento del problema.....	16
1.2 Interrogantes de la investigación .....	17
1.2.1 Pregunta general.....	17
1.2.2 Preguntas Especificas.....	17
1.3 Objetivos de la investigación.....	17
1.3.1 Objetivo general .....	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	18
1.4 Justificación .....	18
Capítulo II. Marco Teórico .....	20
2.1 Antecedentes.....	20
2.2 Descripción general de los pavimentos .....	21
2.2.1 Pavimento 21	
2.2.2 Estructura física de pavimentos.....	21
2.2.3 Tipos de pavimentos.....	22
2.2.4 Pavimento de concreto.....	22
2.2.5 Estructura de pavimento rígido.....	23
2.2.6 Tipología de pavimentos rígidos.....	23
2.3 Consideraciones en el diseño de pavimentos .....	24
2.3.1 Clasificación de las calles y carreteras.....	24
2.3.2 Selección de variables de diseño .....	25
2.3.3 Criterios de diseño.....	25
2.3.4 Características de los materiales .....	26
2.3.5 Efectos de la temperatura en el pavimento.....	26
2.3.6 Estimación del costo del ciclo de vida.....	26
2.3.7 Volúmenes de Transito.....	26
2.4 Control de calidad en la construcción de pavimentos de concreto.....	27
2.5 Métodos Tradicionales del Diseño de pavimentos.....	27
2.5.1 Método AASHTO.....	27

2.6	Pavimento tipo TCP.....	35
2.6.1	Filosofía del diseño TCP .....	35
2.6.2	Concepto de diseño de losa TCP .....	37
2.6.3	Características principales del diseño TCP .....	38
2.6.4	Especificaciones técnicas del pavimento TCP.....	39
2.6.5	Diseño de losas cortas TCP.....	41
2.6.6	Metodología de diseño de losas cortas TCP.....	41
2.6.7	Factores y parámetros para el diseño de losas cortas.....	42
2.7	Método TCP para el diseño de pavimento .....	44
2.7.1	Posición de daño crítico .....	45
2.7.2	Tránsito      45	
2.7.3	Porcentaje de Losas Agrietadas (TTcracks) .....	46
2.7.4	Confiabilidad 46	
2.7.5	Módulo de reacción de la subrasante .....	46
2.7.6	Propiedades del concreto.....	47
2.7.7	Factores de borde por tipo de ajuste .....	48
2.7.8	Alabeo      49	
2.7.9	Esfuerzos de alabeo .....	49
2.7.10	Transferencia de carga.....	50
2.7.11	Índice de rugosidad internacional (IRI) .....	50
2.7.12	Características de la subrasante .....	50
2.7.13	Características de la subbase.....	51
2.7.14	Geotextil      52	
2.8	Marco normativo de la metodología TCP .....	52
2.8.1	Respecto al área de suelos.....	52
2.8.2	Respecto al concreto .....	53
2.9	Variables de Entrada y Salida Del Software Optipave 2.0 .....	53
2.9.1	Parámetros de diseño del tipo de pavimento .....	54
2.9.2	Parámetro de Diseño de Trafico.....	57
2.9.3	Parámetros de Diseño de Concreto.....	60
2.9.4	Parámetros del suelo.....	62
2.9.5	Clima      64	
2.9.6	Resultados que se obtiene.....	65
	Capítulo III. Metodología.....	66
3.1	Descripción Del Lugar De Ejecución.....	66
3.2	Población Y Muestra .....	66
3.2.1	Población.....	66
3.2.2	Muestra.....	66
3.2.3	Muestreo.....	67

3.3	Tipo De Investigación.....	67
3.4	Nivel De Investigación.....	67
3.5	Hipótesis	67
3.6	Variables	67
3.6.1	Variables Independientes.....	67
3.6.2	Variables Dependientes .....	68
3.7	Tipo De Diseño .....	68
3.8	Materiales .....	68
3.8.1	Sub Base granular .....	68
3.8.2	Agua.....	69
3.8.3	Concreto $f'c=350\text{kg/cm}^2$ .....	69
3.9	Metodología.....	69
3.9.1	Método De Estudio.....	69
3.9.2	Técnicas e Instrumentos De Recolección De Datos .....	70
3.9.3	Procedimiento de investigación.....	71
3.9.4	Técnicas De Procedimiento De Datos, Interpretación Y Análisis De Resultados .....	71
3.9.5	Campo de estudio.....	72
3.10	Análisis de datos.....	73
3.10.1	Hipótesis.....	73
3.10.2	Nivel de significancia .....	74
3.10.3	Regla de decisión.....	74
	Capítulo IV: Resultados y discusión .....	75
4.1	Presentación de Resultados .....	75
4.1.1	Caracterización del material de la subrasante.....	75
4.1.2	Caracterización del material de la subbase granular .....	76
4.2	Diseño de pavimento alternativo metodología TCP.....	81
4.2.1	Periodo de diseño .....	81
4.2.2	Distribución de ejes (Recomendado por TCP).....	81
4.2.3	Tránsito (Recomendado por Tcp).....	81
4.2.4	Carga.....	81
4.2.5	IRI.....	81
4.2.6	Capacidad de soporte del suelo de fundación.....	82
4.2.7	Base granular .....	82
4.2.8	Propiedades del concreto.....	82
4.2.9	Confiabilidad.....	82
4.2.10	Escalonamiento promedio máximo permitido (mm) .....	82
4.2.11	Porcentaje máximo de losas agrietadas admisible.....	82
4.2.12	Clima.....	82



4.2.13	Sello de juntas .....	82
4.2.14	Barras de amarre .....	82
4.2.15	Confinamiento lateral .....	82
4.3	Espesor determinado por el programa $e = 131$ mm .....	83
4.4	Proceso constructivo del pavimento optimizado .....	85
4.4.1	Consideraciones preliminares.....	85
4.4.2	Tareas previas al vaciado .....	89
4.4.3	Procedimiento del vaciado .....	89
4.5	Ensayos realizados al concreto .....	94
4.5.1	Resistencia a la compresión y módulo de ruptura .....	94
4.6	Análisis de costos .....	95
4.7	Evaluación del pavimento después de un año .....	97
4.7.1	Ensayos de resistencia a la compresión con esclerómetro .....	97
4.7.2	Índice de rugosidad Internacional (IRI) .....	98
4.7.3	Evaluación de fisuras mediante fotometría .....	102
4.8	Discusión de resultados.....	102
4.8.1	Subrasante.....	102
4.8.2	Subbase.....	102
4.8.3	Pavimento rígido TCP.....	103
4.8.4	Comparación con pavimento convencional.....	103
4.8.5	Diferencias entre costos.....	104
4.8.6	Método TCP.....	104
4.8.7	Evaluación del pavimento con un año de vida útil.....	105
4.9	Prueba de hipótesis.....	108
4.9.1	Prueba de las Hipótesis Específicas de la investigación .....	108
Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones.....		109
5.1	Conclusiones.....	109
5.2	Recomendaciones.....	109
Referencias.....		111
ANEXOS.....		113

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1_Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad (R) y Desviación Estándar Normal (Zr). Para una sola etapa de 20 años según rango de Tráfico.....	29
Tabla 2_Calificación de la serviciabilidad .....	30
Tabla 3_Índice de serviciabilidad final. ....	30
Tabla 4_Valores recomendados del coeficiente de drenaje Cd.....	32
Tabla 5_Valores de coeficiente de transmisión de cargas J .....	33
Tabla 6. Resultados dimensiones de la losa vs Esfuerzo máximo.....	37
Tabla 7_Porcentaje de pasadas .....	45
Tabla 8_Distribución de ejes .....	45
Tabla 9_Daño admitido (TTracks) .....	46
Tabla 10.Resistencia a la flexotracción característica (80 %).....	48
Tabla 11 Parámetros de diseño.....	48
Tabla 12 Factores de ajuste por tipo de borde .....	48
Tabla 13.Transferencia de carga.....	50
Tabla 14.Índice de rugosidad internacional.....	50
Tabla 15.Categorías de Sub rasante.....	51
Tabla 16 Vida de diseño recomendado según clasificación del pavimento .....	54
Tabla 17 Tipos de borde en términos de soporte y circulación del tráfico.....	55
Tabla 18.Valores recomendados de porcentaje máximo admisible de losas agrietadas según la clasificación de la vía.....	55
Tabla 19.Confiabilidad según la clasificación de la vía. ....	56
Tabla 20.Grupo de Clasificación de Tráfico Recomendado.....	57
Tabla 21.Grupo de clasificación de Tráfico Recomendado según uso del pavimento según tipo de vehículos.....	57
Tabla 22Valores por defecto de las distancias entre el borde, la línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos.....	60
Tabla 23Desviación Estándar según tipo de Borde .....	60
Tabla 24Valores mínimos recomendados según tipo de suelo.....	63
Tabla 25 Diseño de la investigación.....	68
Tabla 26. Normativa para la validación de ensayos .....	71
Tabla 27.Diagrama de flujo del Método de Diseño Utilizado por Optipave.....	72
Tabla 28 Planteamiento de hipótesis: Espesor .....	73

Tabla 29 Planteamiento de hipótesis: costo del pavimento.....	73
Tabla 30. Características granulométricas – Subrasante – Calicata 01 .....	75
Tabla 31. Resultados del ensayo de límites de consistencia – Subrasante .....	75
Tabla 32. Características mecánicas de la subrasante – Calicata 01 .....	76
Tabla 33. Características granulométricas - Cantera Isla .....	77
Tabla 34. Resultados del ensayo de límites de consistencia-Cantera Isla.....	77
Tabla 35. Características granulométricas-Cantera Vallecito .....	78
Tabla 36. Resultados del ensayo de límites de consistencia – Cantera Vallecito .....	78
Tabla 37 Combinación de canteras Isla y Vallecito .....	79
Tabla 38 Características granulométricas-canteras combinadas .....	80
Tabla 39Características físicos - mecánicas .....	80
Tabla 40 Resistencia a la compresión y correlación para Módulo de ruptura.....	94
Tabla 41 Análisis de costos unitarios de pavimento rígido .....	95
Tabla 42. Análisis de costos unitarios de pavimento TCP .....	95
Tabla 43. Comparación de costo de métodos TCP y ASSHTO .....	96
Tabla 44 Resistencia a la compresión con esclerómetro .....	98
Tabla 45 Determinación del IRI con nivel de ingeniero. ....	99
Tabla 46 Adaptación de las cotas topográficas al formato ERD.....	100
Tabla 47 Índice de rugosidad del pavimento TCP evaluado un año después.....	101
Tabla 48 Comparación de variables entre el pavimento TCP vs ASSHTO .....	104
Tabla 49 Requerimientos De IRI según tipo de superficie bajo norma de Chile .....	105

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Estructura física de un pavimento .....	21
Figura 2. Sección longitudinal de un pavimento de concreto con refuerzo discontinuo distribuido sin función estructural. ....	24
Figura 3. Sección longitudinal de un pavimento de concreto reforzado continuo sin función estructural .....	24
Figura 4. Flujograma de diseño utilizando el método AASHTO 1993. ....	34
Figura 5. Comparación de cargas de vehículos de diseño .....	36
Figura 6. Posiciones de ejes de ruedas en un área de pavimento .....	38
Figura 7. Porcentaje de pasadas sobre cada lugar en las losas, que genera el mayor daño por fatiga .....	38
Figura 8. Concepto del diseño de losas optimizadas .....	41
Figura 9. Factor C1.....	43
Figura 10. Porcentaje de pasadas sobre cada lugar en las losas .....	47
Figura 11. Esquema típico de un pavimento con una subrasante elevada.....	51
Figura 12. Distribución Lateral Típica de un Pavimento de Concreto .....	59
Figura 13. Distribución Lateral para un pavimento con solera en el borde.....	59
Figura 14. Distribución Lateral del tráfico para un pavimento con sobrecancho .....	60
Figura 15. Retracción típica del concreto en el tiempo .....	62
Figura 16. Gráfico de resultados granulométricos - Subrasante - Calicata 01 .....	75
Figura 17. Gráfico de resultados granulométricos-Cantera Isla .....	76
Figura 18. Gráfico de resultados granulométricos-Cantera Vallecito .....	77
Figura 19. Gráfico de resultados granulométricos-Combinación teórica – Cantera Isla - Vallecito.....	79
Figura 20. Grafica de resultados granulométricos -Combinación de canteras Isla y Vallecito .....	80
Figura 21. Espesor calculado por software OptiPave 2.....	83
Figura 22. Porcentaje de losas agrietadas (%) .....	83
Figura 23. Escalonamiento promedio .....	84
Figura 24. IRI promedio .....	85
Figura 25. Batido de material granular para subbase .....	86
Figura 26. Extendido del material de subbase en todo el ancho de la vía .....	86
Figura 27. Compactación de subbase con rodillo vibratorio, y apisonador mecánico .....	87

Figura 28. Ensayo de densidad de campo mediante cono de arena.....	87
Figura 29. Encofrado de los paños del pavimento h: 13cm.....	88
Figura 30. Verificación del Slump .....	90
Figura 31. Colocado del concreto $MR=48\text{kg/cm}^2 - F'c=350\text{kg/cm}^2$ .....	90
Figura 32. Vibrado del concreto con equipo manual.....	91
Figura 33. Regleado de paño de concreto con equipo.....	91
Figura 34. Acabado con plancha metálica.....	92
Figura 35. Corte de juntas después de 20 horas. ....	93
Figura 36. Curado del pavimento .....	93
Figura 37. Gráfico costo m <sup>2</sup> vs método de pavimentación .....	96
Figura 38. Puntos de ensayo de resistencia a la compresión con esclerómetro.....	97
Figura 39. Ensayo de esclerometría.....	98
Figura 40. Levantamiento topográfico para determinar el IRI.....	99
Figura 41. Visualización del perfil de las huellas de circulación del pavimento TCP.....	101
Figura 42. Visualización de los valores de rugosidad obtenido en intervalos de 0.5m....	101
Figura 43. Inspección visual con dron DJI Phantom .....	102
Figura 44. Fisuras en pavimento TCP $e=0.13\text{m}$ .....	107
Figura 45. Fisuras en pavimento ASSHTO $e=0.20\text{m}$ .....	107

## RESUMEN

Se propone la aplicación de un método para optimizar el espesor de un pavimento rígido utilizando la metodología de Diseño TCP, en español Pavimento de losas cortas. Se realizó el estudio de canteras Vallecito e Isla para su utilización como material de préstamos de la subbase granular, cumpliendo los parámetros establecidos en los porcentajes 45% y 55% respectivamente.

Se realizó el diseño del pavimento, que trata en que las ruedas o un set de ruedas actúen de manera independiente en cada losa, que tiene un espesor de 13cm y mide 1.25 x 1.80 m, esto produce una reducción en las tensiones del pavimento, estas reducciones de tensiones permitieron reducir el espesor del pavimento rígido en 7cm frente a un pavimento ASSHTO de espesor de 20cm.

Los costos por metro cuadrado de ambos pavimentos, tienen una diferencia porcentual de 21%, siendo el pavimento TCP más económico.

A un año de vida útil, se realizaron evaluaciones para medir la rugosidad (IRI); en el primero el pavimento TCP tiene un IRI =2.67m/km, menor al solicitado por la norma que es IRI=2.8m/km; interpretando que es un pavimento nuevo con imperfecciones superficiales.

Se realizó una comparación de porcentaje de losas agrietadas, de ambos pavimentos, teniendo al TCP con 0% de grietas; mientras que el pavimento ASSHTO ya tiene grietas transversales y longitudinales en algunos paños.

Teniendo dichas consideraciones se implantó una nueva tecnología de aplicación de pavimentación de calles denominado TCP (Thin Concrete Pavements), puesto que los pavimentos convencionales: rígido y flexible ante cargas solicitadas de tráfico no llegan a cumplir el tiempo de vida útil, generando gastos elevados de rehabilitación o mantenimiento.

Palabras clave: TCP (Think Pavement Concret), Optipave 2.0, alabeo, tensiones, subbase granular, coeficiente estructural, IRI.

## ABSTRACT

It is proposed to apply a method to optimize the thickness of a rigid pavement using the TCP Design methodology, in Spanish Short slab pavement. The study of Vallecito and Isla quarries was carried out for its use as loan material of the granular subbase, complying with the parameters established in the percentages 45% and 55% respectively.

The design of the pavement was carried out, which deals with the wheels or a set of wheels acting independently on each slab, which has a thickness of 13cm and measures 1.25 x 1.80m, this produces a reduction in the stresses of the pavement, these stress reductions reduced the thickness of the rigid pavement by 7cm compared to an ASSHTO pavement with a thickness of 20cm.

The costs per square meter of both pavements have a percentage difference of 21%, being the cheapest TCP pavement.

At one year of useful life, evaluations were performed to measure roughness (IRI); in the first, the TCP pavement has an IRI = 2.67m / km, lower than that required by the standard, which is IRI = 2.8m / km; interpreting that it is a new pavement with superficial imperfections.

A comparison of the percentage of cracked slabs of both pavements was performed, having the TCP with 0% cracks; while the ASSHTO flooring already has transverse and longitudinal cracks in some panels.

Taking these considerations into account, a new street paving application technology called TCP (Thin Concrete Pavements) was implemented, since conventional pavements: rigid and flexible in the face of requested traffic loads, do not reach the useful life time, generating high costs of rehabilitation or maintenance.

Keywords: TCP (Think Pavement Concret), Optipave 2.0, warping, stresses, granular subbase, structural coefficient, IRI.

## Capítulo I. El problema

### 1.1 Planteamiento del problema

Según el Plan Vial Provincial Participativo San Román, “el tipo de superficie del sistema vial de la provincia comprende en su mayoría Afirmados y Trochas, teniendo 30.1% y 45.1% respectivamente, los cuales comprenden las vías vecinales en su mayoría los cuales están en su mayoría en el distrito más grande: Juliaca”. (PAT, 2017).

En la ciudad de Juliaca se observó que en su mayoría las calles urbanas cuentan con un tipo de pavimento flexible, por ser la más comercial, sin embargo, la mala conformación de las capas inferiores y un mal proceso constructivo originan el deterioro prematuro de las vías asfaltadas ante el tránsito, estos problemas a lo largo de la vida “útil” del pavimento ameritan costos elevados en el mantenimiento y reparaciones. En contraste a esto, los pavimentos rígidos recién comienzan a ser vistos como alternativas para la pavimentación de vías urbanas.

Los diseños empleados por el MTC para la construcción de pavimentos rígidos utilizan la metodología AASHTO 93, y se toma como referencia la norma técnica CE.010.; mismas que recomiendan que las juntas y dimensiones de las losas sean de 2.4 a 3.70m, y teniendo un máximo de 4.00m de longitud.

Los diseños mencionados son los más empleados, pero el origen principal que genera las fallas son las dimensiones utilizadas de las losas de concreto, las que reciben el esfuerzo generado por las ruedas y/o set de ruedas de los vehículos en los extremos de las losas, lo cual genera mayores tensiones, generando la aparición de fisuras en periodos más cortos en comparación con su vida útil de diseño. Para poder contrarrestar este efecto, lo que se hace es aumentar el espesor del pavimento para poder resistir dichas tensiones.

Se presenta una alternativa de solución que es la metodología de diseño de losas cortas con sus siglas en inglés TCP, la cual busca contrarrestar el efecto mencionado, mediante la disminución de las dimensiones de las losas de concreto, de forma que cada losa sea sometida solo a una rueda y/o un set de ruedas, lo que genera menor tensión, y



de forma consecuente se disminuye el espesor de la losa, sin afectar la resistencia del pavimento en comparación con uno diseñado por la AASHTO 93.

Se tomará como caso de estudio el acceso principal de la Universidad Peruana Unión FJ, que presenta una tasa de crecimiento del flujo vehicular anual del 3% (Chura & Romero, 2017), la cual en la actualidad se encuentra en un mal estado debido a la escasa o nula conservación y/o mantenimiento que esta presentó durante su vida útil.

## **1.2 Interrogantes de la investigación**

### **1.2.1 Pregunta general.**

¿La aplicación del pavimento de losas cortas TCP, será la óptima para ser empleada en el acceso de la UPeU en los aspectos técnicos y económicos?

### **1.2.2 Preguntas Específicas.**

¿Cuáles son las dimensiones y espesor adecuados para pavimentos de losas cortas TCP respecto a las tensiones generadas de acuerdo con el tipo de vehículo que transitará?

¿Cuáles son las características y propiedades que deberán cumplir la estructura del pavimento de losas cortas TCP, en comparación con un pavimento que utiliza la metodología del AASHTO?

¿Cuál será la diferencia de costos entre la metodología TCP y la metodología de la AASHTO?

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1 Objetivo general.**

Demostrar que la aplicación de la tecnología de pavimento de losas cortas TCP cumplen con los requerimientos técnicos y económicos necesarios para el acceso de la UPeU.

### 1.3.2 Objetivos específicos.

Determinar las dimensiones y el espesor adecuado de una losa corta TCP respecto a la carga existente de dicha vía.

Evaluar las características y propiedades que deberían cumplir las estructuras del pavimento como: la carpeta de rodadura, subbase y subrasante de un pavimento de losa corta TCP y un pavimento utilizando la metodología del AASHTO 93; en el acceso de la UPeU.

Determinar el costo de la metodología TCP y su diferencia de costos respecto a la metodología AASHTO 93, y la norma CE.010.

### 1.4 Justificación

El Manual de Carreteras, en la Sección de Suelos y pavimentos menciona, en el inciso 14.3 Juntas longitudinales y juntas transversales, menciona lo siguiente: “la longitud de la losa no debe de ser mayor a 1.25 veces el ancho y no sea mayor a 4.50m. **En zonas de altura mayores a 3000msnm se recomienda que las losas sean cuadradas o en todo caso, losas cortas** conservando el espesor definido según AASHTO y el Manual”. (MTC, 2014).

Ahora bien, continuando la lectura de dicho manual, no se observa razón alguna para que a mayores alturas de 3000msnm se tenga que hacer losas cortas, no se tiene referencia alguna. La ciudad de Juliaca está a 3825 msnm, aplicando la norma, la estructura de los pavimentos rígidos deberían de ser losas cortas, pero conservando el espesor calculado por la metodología AASHTO.

El problema que se presenta al diseñar pavimentos rígidos bajo la metodología AASHTO 93 en las vías de la ciudad de Juliaca, es que se utilizan parámetros de espesor en un margen de 0.15 a 0.20 m, sin considerar si es para un tránsito alto, medio o bajo; lo cual genera un sobre costo en la construcción. De la misma forma se pueden observar fallas

o fisuras en las juntas longitudinales, transversales y centros de losa, producidos por tensión por carga (tránsito) y tensión por alabeo (temperatura).

En los últimos años se han realizado investigaciones tecnológicas mediante diversas metodologías que sean alternativas de diseño a la AASHTO 93, una de ellas es la del método de losas cortas TCP, la cual pretende mejorar el diseño de un pavimento rígido y poder brindar un ahorro en el uso de los recursos en la construcción.

**Viabilidad social:** Uno de los parámetros de mejora al usar esta metodología es la serviciabilidad de los pavimentos para que cumplan su tiempo de vida útil, y la disminución de costos; permitiendo intervenir en la construcción de más áreas no pavimentadas y de esta manera favorecer el crecimiento de la ciudad de Juliaca.

**Relación Costo / Beneficio de la Investigación:** La investigación por ser de carácter cuasi experimental, su costo al realizarla será menor, en comparación al beneficio mayor, dado que la metodología propuesta TCP brinda ahorros sustanciales tangibles e intangibles, como se apreciará líneas abajo en los antecedentes.

## Capítulo II. Marco Teórico

### 2.1 Antecedentes

**ROMAN ÁVILA, R. (2008) Método constructivo de losas cortas en pavimentos de concreto hidráulico.** Tesis de grado, para optar el grado de magister en Ciencias de Ingeniería Vial, Escuela de Post Grado de la Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional de San Carlos de Guatemala.

Objetivos: Conocer el método constructivo de losas cortas en pavimentos de concreto hidráulico, su base teórica, las características de su evaluación en modelos de simulación por computadora, y el método de construcción.

Resultado: Con la finalidad de tener una acertada interpretación de los resultados para los diferentes análisis realizados, debe considerarse la mayor cantidad de información posible, aunque en el caso específico de este método por ser una innovación en este tipo de pavimento, actualmente los estudios existentes respecto al mismo son escasos.

Conclusiones: Según evaluaciones visuales se estableció que los tramos evaluados, presentan algún tipo de deterioro; y, a pesar que la mayoría son de reciente construcción presentan características de deterioro estructural leve según la clasificación sugerida para este efecto.

**MENDOZA GARCIA, Hamilton. (2015). Evaluación del diseño de losas cortas (TCP) en pavimentos según tensiones.** Tesis para obtener el título profesional de Ingeniero civil. Facultad de Ingeniería de Minas Geología y Civil. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga.

Objetivos: Determinar las tensiones en las losas cortas (TCP) y pavimentos con el AASHTO 93. Determinar las dimensiones y espesor adecuada de las losas cortas TCP respecto a las tensiones generados por los ejes de acuerdo al tipo de vehículo que transitara.

Conclusiones: El empleo del diseño 'TCP' en los pavimentos es relativamente nueva, si bien hay experiencias en los países de Chile, Guatemala y obras privadas en Perú. A pesar de ello en nuestro medio aún no es de conocimiento masivo. El alto rendimiento de colocación y la economía lograda frente a los pavimentos de concreto convencional, debido a la reducción de espesores con la misma vida útil como se demostró en la investigación, hacen del Diseño TCP una alternativa potencial de aplicación. Las deformaciones generadas por cargas dinámicas en las losas con diseño TCP resultaron ser mayores que las deformaciones de losas con AASHTO, esto se generó debido a que sus espesores son menores. Por ello necesitan un mayor aporte de resistencia a nivel de subbase ya que para un pavimento tradicional las tensiones son absorbidas por la losa del concreto debido al

espesor que tiene. Mientras las deformaciones por variación de temperatura positiva y negativa resultaron ser menores debido a la reducción de las dimensiones de las losas ya que los alabeos están directamente relacionados con la longitud de éstas.

## 2.2 Descripción general de los pavimentos

### 2.2.1 Pavimento.

Se trata de una estructura de material seleccionado, dispuesta horizontalmente en una serie de capas, que absorbe directamente las cargas de tráfico y las transmite de forma derivada a las capas inferiores, creando una superficie de circulación para el movimiento de personas, animales y/o vehículos.

Los estratos de un pavimento tienen una constitución en base a la función estructural, tiene que ser resistente a las cargas solicitadas, a los factores climatológicos y al desgaste ocasionado por el tránsito constante.

La composición de los estratos está en base a la capacidad de disipar o resistir las cargas de diseño, estas decrecen conforme la profundidad se incrementa, por lo tanto, se deberá colocar los materiales de mayor capacidad en la parte superior y la de menor capacidad en la parte inferior.

### 2.2.2 Estructura física de pavimentos.

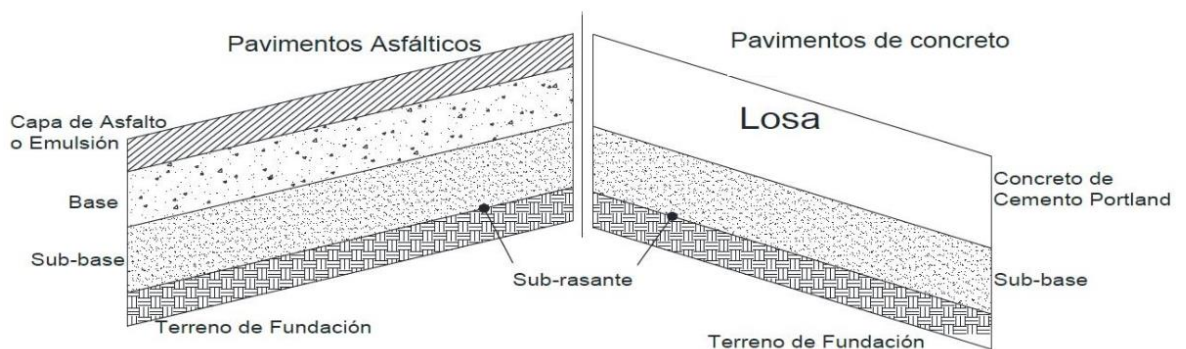


Figura 1. Estructura física de un pavimento

- Subrasante: Estrato inicial en el que se coloca el pavimento. Se tiene un requerimiento mínimo en la calidad del material.
- Sub – base: Estrato constituido de material granular, que presenten mediana capacidad de resistencia a esfuerzos, pueden ser obtenidos de forma natural o procesados. Deben de cumplir requisitos de calidad solicitados por la normativa vigente.

- Base: Una capa con mayor capacidad de carga que la subestructura. Puede obtenerse de forma natural o procesada con la adición de material ligante. Debe cumplir los requisitos de calidad establecidos en la normativa vigente.
- Superficie de rodadura: La capa superior puede ser de hormigón, emulsión asfáltica o elementos articulados. Su función es transferir directamente las cargas generadas por el tráfico.

### **2.2.3 Tipos de pavimentos.**

Los pavimentos se clasifican en base a la estructura que transmitirá las cargas a los estratos inferiores, se dividen en:

- Pavimentos flexibles
- Pavimentos Rígidos (concreto)
- Pavimentos articulados

### **2.2.4 Pavimento de concreto.**

La composición de un pavimento rígido es de una losa de concreto que puede ser armado o simple, está apoyado sobre una subbase granular. Por la naturaleza del concreto, este absorbe un porcentaje considerable de los esfuerzos generados por el tránsito, por lo que la distribución de cargas es buena, y las tensiones generadas son disipadas antes de llegar a la subrasante.

La constitución estructural de este pavimento cumple con resistir los esfuerzos normales y tangenciales generados por el tránsito, adicionalmente presentan resistencia a la flexotracción, al desgaste y tiene un elevado módulo de elasticidad.

La carpeta de concreto disipa más del 50% de la carga solicitada, para esto debe tener un espesor que en el caso más desfavorable solo transmita tensiones débiles a la subrasante o terreno de fundación, y que la subbase pueda ser apta para resistir la diferencia de cargas sometidas.

Las principales características son:

- *Periodo largo de servicio.*
- *Prever bajo mantenimiento.*

Hay factores que influyen en el diseño y la funcionalidad del suelo:

- *Tráfico.*
- *Clima*
- *Diseño vial*
- *Construcción y mantenimiento.*

## 2.2.5 Estructura de pavimento rígido.

### a) Subrasante

La capa de suelo de una carretera que sostiene la estructura del pavimento y se prolonga hasta una profundidad que no afecta a la carga de diseño para el tráfico previsto. Esta capa puede conformarse en corte o en relleno. Debe cumplir los requisitos de resistencia, incompresibilidad e insensibilidad a la dilatación y contracción por la acción de la humedad.

### b) Subbase

Es la capa de la estructura del pavimento que sirve principalmente para soportar, transmitir y distribuir uniformemente las cargas que actúan sobre la superficie del pavimento, de manera que la subestructura pueda absorberlas, absorbiendo las variaciones inducidas por el suelo que puedan actuar sobre la subestructura. La subestructura debe controlar los cambios de volumen y elasticidad que serían perjudiciales para el pavimento.

También se utiliza como capa de drenaje y para controlar el ascenso capilar del agua para proteger la estructura del pavimento, por lo que generalmente se utilizan materiales granulares.

### c) Superficie de rodadura

Es la estructura superior del pavimento y está hecha de concreto. Debido a su rigidez y alto módulo de elasticidad, su capacidad de carga se basa en la losa y no en la capacidad de carga de la subrasante, ya que no utilizan una capa de base.

## 2.2.6 Tipología de pavimentos rígidos.

### a) *Pavimento de Concreto simple*

En este tipo de pavimento, el concreto absorbe y soporta las cargas causadas por el tráfico y las variaciones de temperatura y humedad. Este pavimento puede contener o no elementos de transferencia de carga (dowels), cada uno de los cuales tiene su propia área de aplicación.

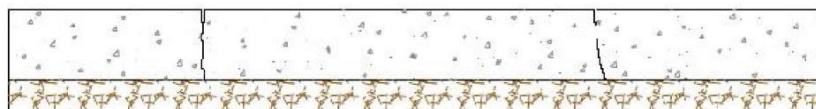
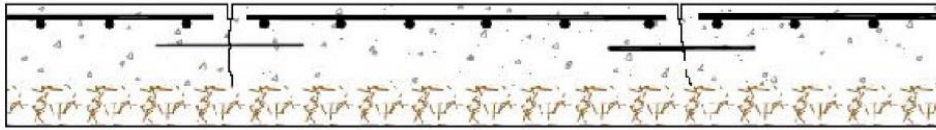


Figura 2. Sección longitudinal de un pavimento de concreto simple

### b) *Pavimento de Concreto con refuerzo discontinuo distribuido sin función estructural*

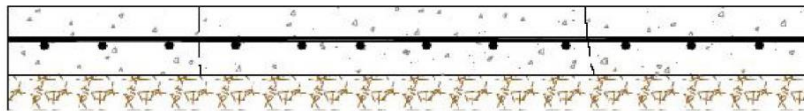
Tienen una mayor separación entre las juntas (entre 6,10 y 36,60 m) y cuentan con refuerzos de acero distribuidos por toda la losa para controlar y mantener cerradas las grietas de contracción.



*Figura 3.* Sección longitudinal de un pavimento de concreto con refuerzo discontinuo distribuido sin función estructural.

### **c) Pavimento de Concreto con refuerzo continuo sin función estructural**

Tiene un refuerzo longitudinal continuo y no tiene juntas transversales, excepto las juntas estructurales. El refuerzo transversal es opcional en este caso. Estos revestimientos tienen un refuerzo mayor que las juntas reforzadas y el propósito de este refuerzo es mantener una separación adecuada de las grietas y mantenerlas cerradas.



*Figura 4.* Sección longitudinal de un pavimento de concreto reforzado continuo sin función estructural

## **2.3 Consideraciones en el diseño de pavimentos**

Uno de los aspectos que hay que tener en cuenta en el diseño de los pavimentos es un análisis fundamental del comportamiento de los mismos bajo la influencia del tráfico, ya que el progreso tecnológico y el crecimiento de la población aumentan el volumen de tráfico, lo que a su vez conlleva un mayor número de ejes y cargas.

Por ello, es necesaria la selección de apropiados factores para el diseño estructural de los diferentes tipos de pavimentos, por lo que deberá tomarse en cuenta la clasificación de la carretera dentro de la red vial, la selección de los diferentes tipos de materiales a utilizarse, el tránsito y los procesos de construcción, Es necesario tener conocimiento sobre el tránsito, medio ambiente y condiciones de la subrasante para la cantidad de vehículos que circula en las carreteras, adicionalmente la calidad de materiales y especificaciones o normas de construcción son requeridas para mejorar el rendimiento de ellas por muchos periodos de tiempo. (Menéndez, 2012).

### **2.3.1 Clasificación de las calles y carreteras.**

La clasificación es el proceso por medio del cual las calles y carreteras son organizadas dentro de un sistema funcional, de acuerdo con el carácter de servicio que prestan y que



ayude a seleccionar los factores apropiados de tránsito y otras variables que sean necesarias. (CHAVEZ, 2005)

### **2.3.2 Selección de variables de diseño.**

Las propiedades de la subrasante, características de los materiales, importancia del tránsito, factores de medio ambiente y otro tipo de variables, son las que intervienen en el diseño de estructuras de pavimento. En el caso de las carreteras y caminos más pequeños, esta información a menudo no está disponible o no está actualizada y es necesario recopilarla.

Se indican algunos valores de diseño, que pueden variar en función del tipo de carretera o del volumen de tráfico. Se han elegido valores más conservadores para el tráfico pesado, lo que se traduce en espesores mayores. Por ejemplo, el valor de la tensión de diseño para la base puede ser bajo para tráfico alto, pero aceptable para tráfico bajo.

Poco conocimiento de las características de la subrasante y las propiedades de otros materiales particularmente de la pavimentación, variarán su calidad y desempeño, lo que traerá como consecuencia un alto costo de mantenimiento; también la selección del tipo de base puede afectar el comportamiento del pavimento. (MONTEJO, 2006)

### **2.3.3 Criterios de diseño.**

En los procedimientos de diseño, la estructura del pavimento se considera un sistema multicapa y los materiales de cada capa se caracterizan por su propio módulo de elasticidad.

La evaluación de tránsito está dada por la repetición de una carga en un eje simple equivalente de 80 kN (18,000 lbs) aplicada al pavimento en un conjunto de dos juegos de llantas dobles.

Este método se utiliza para diseñar pavimentos compuestos por diferentes combinaciones de superficies, capas de base y capas de subbase. La subestructura, la capa más baja de la estructura del pavimento, se supone infinita en las direcciones vertical y horizontal, y las otras capas de espesor finito se suponen finitas en la dirección horizontal. Se supone que la superficie de contacto entre las capas tiene plena continuidad o adhesión. (Covarrubias, 2012).

En la metodología de diseño, las cargas que actúan sobre la superficie del pavimento generan dos tensiones críticas de diseño: la tensión de tracción horizontal  $\varepsilon_{T1}$  en el fondo de la capa superficial y la tensión de compresión vertical  $\varepsilon_{C1}$  en la superficie de la subestructura.

Si el esfuerzo de tracción horizontal es demasiado elevado, pueden aparecer grietas en la capa superficial. Si la fuerza de compresión vertical es demasiado grande, se producirán deformaciones permanentes en la estructura del pavimento debido a la sobrecarga de la subestructura.

Una excesiva deformación de las capas solamente puede ser controlada por las limitaciones de las propiedades de los materiales. (CORONADO, 2002)

#### **2.3.4 Características de los materiales.**

Todos los materiales están caracterizados por el Módulo de Elasticidad, llamado Módulo Dinámico en mezclas asfálticas; Módulo de Resiliencia para los materiales granulares sin tratar y los materiales de los suelos. El Módulo Dinámico en mezclas de asfalto es dependiente de la temperatura sobre el pavimento.

Se utilizan tres distribuciones típicas de temperaturas medias mensuales, que representan tres regiones típicas, para simular el impacto de la temperatura y los cambios interanuales.

#### **2.3.5 Efectos de la temperatura en el pavimento.**

Además de los cambios de temperatura a lo largo del año sobre el módulo dinámico de las mezclas asfálticas, las curvas de diseño también se ven afectadas por la influencia de la temperatura sobre el módulo de elasticidad de la base y los materiales granulares de la estructura del pavimento.

Para la subrasante esto se realiza al incrementarse el Módulo de Resiliencia de la misma en el período de enfriamiento y se reduce cuando se produce calentamiento. (AASHTO-93, 2007).

#### **2.3.6 Estimación del costo del ciclo de vida.**

En los procedimientos de diseño es necesario realizar un estudio de costo del ciclo de vida de las alternativas de pavimentos diseñados, que le permitan al diseñador tomar una decisión sobre los tipos de pavimentos más convenientes a construir, tomando también en consideración las políticas de mantenimiento. (MONTEJO, 2006)

#### **2.3.7 Volúmenes de Transito.**

Cuando se diseñan estructuras de pavimento con capas de rodadura de asfalto y concreto, el método o la técnica más utilizada es siempre el siguiente.

AASHTO; este método requiere la siguiente información en las ecuaciones de diseño: la carga del eje, la configuración del eje y el número de veces que el eje pasa por la superficie del pavimento.

Los pavimentos se diseñan en función de los efectos de los daños causados por el paso de un eje cargado y se diseñan para soportar un determinado número de cargas a lo largo de su vida útil.

Un tránsito mixto está compuesto de vehículos de diferente peso y número de ejes y que para efectos de cálculo se les transforma en un número de ejes equivalentes de 80 KN o 18 kips<sup>2</sup>, por lo que se les denominará ESAL o ejes equivalentes. (AASHTO, 1993).

## **2.4 Control de calidad en la construcción de pavimentos de concreto**

La calidad de la construcción de los pavimentos de concreto, y de los pavimentos en general, es fundamental para lograr el rendimiento esperado durante la vida útil del pavimento. La calidad de la construcción en cada etapa, desde la preparación de la sub-base hasta la terminación, tiene un impacto significativo en el rendimiento del pavimento.

Hay que tener en cuenta que un buen diseño de la mezcla o de la construcción del pavimento no puede compensar una mala mano de obra, y viceversa. Toda la construcción debe ser conforme al diseño y debe ir acompañada de un control de calidad.

La construcción de pavimentos de concreto puede definirse como una combinación de ciencia y arte, ya que existen muchas opciones diferentes, cada una de las cuales corresponde a una combinación particular de factores tales como: tamaño del proyecto, plazo del proyecto, espesor de la losa, condiciones ambientales, materiales, equipos, etc. Aquí es donde entra la ingeniería, el "arte" de identificar, seleccionar, diseñar e implementar las mejores prácticas posibles en la ejecución del proyecto.

Aunque la construcción de pavimentos de concreto puede variar en función de la logística de la obra, se pueden distinguir los siguientes procesos: preparación del terreno, producción de la mezcla de concreto, transporte, colocación y vibrado del concreto, nivelación o enrasado, acabado y texturizado, curado, corte y sellado de juntas.

## **2.5 Métodos Tradicionales del Diseño de pavimentos**

### **2.5.1 Método AASHTO.**

En 1986 se presentó una guía para el diseño de pavimentos rígidos en la publicación "Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimentos"; en 1993 se presentó una revisión del manual, que fue adoptada por las normas peruanas vigentes como el Manual de Carreteras "Sección Suelos y Pavimentos" y la Norma Técnica CE 010.

El método AASHTO permite calcular el espesor del pavimento que puede soportar el volumen de tráfico estimado, expresado en 80 kN de carga por eje equivalente, sin reducir el índice de servicio (PSI) calculado a partir de la serie de mediciones (rugosidad de la superficie, agrietamiento, baches). La fórmula general de la AASHTO para el diseño de pavimentos rígidos se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$\log_{10} W_{82} = Z_R S_o + 7.35 \log_{10} (D + 25.4) - 10.39 + \frac{\log_{10} \left( \frac{\Delta PSI}{4.5 - 1.5} \right)}{1 + \frac{1.25 \times 10^{19}}{(D + 25.4)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32 P_t) \times \log_{10} \left( \frac{M_r C_{dx} (0.09 D^{0.75} - 1.132)}{1.51 \times J \left( 0.09 D^{0.75} - \frac{7.38}{\left( \frac{E_c}{k} \right)^{0.25}} \right)} \right)$$

Ecuación 1. Fórmula general para el diseño de pavimentos rígidos - AASHTO 1993.

Donde:

W18 = Número de cargas de 18 kips (80 kN o 8.2 t) previstas.

Zr = Desviación estándar normal.

So = Desvío estándar de todas las variables.

D = Espesor de la losa del pavimento (en pulgadas).

ΔPSI= Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño.

Pt = Índice de serviciabilidad final.

Mr = Resistencia media del concreto (en Mpa) a flexo tracción a los 28 días.

J = Coeficiente de transferencia de carga en las juntas.

Cd = Coeficiente de drenaje.

Ec = Módulo de elasticidad del concreto en Mpa.

K = Módulo de reacción (coeficiente de balasto), dada en Mpa/m de la superficie (base, subbase o subrasante).

El procedimiento de diseño estándar consiste en partir de un espesor de pavimento determinado, realizar pruebas hasta alcanzar el equilibrio y, a continuación, evaluar los factores de diseño adicionales. Si se cumple la situación de equilibrio en la ecuación, entonces el espesor supuesto es correcto. Las variables que afectan al cálculo del espesor del pavimento son:

### 2.5.1.1 Trafico.

Según la metodología estudiada, el tráfico total de la calzada durante el periodo de diseño debe convertirse en un eje simple equivalente de 18 kps (W18).

### 2.5.1.2 Confiabilidad (R).

La confiabilidad es la probabilidad de que el pavimento se comporte satisfactoriamente a lo largo de su vida o período de diseño y resista las condiciones de tráfico y ambientales durante ese período. Si el número previsto de ESALs es menor que el número real de ESALs, la vida del pavimento se acortará. Por lo tanto, la variabilidad del diseño y la construcción tiene un gran impacto en la solidez del diseño.

El MTC recomienda los siguientes valores de fiabilidad para el número de repeticiones de ESAL.

**Tabla 1**  
**Valores recomendados de Nivel de Confiabilidad (R) y Desviación Estándar Normal (Zr). Para una sola etapa de 20 años según rango de Tráfico**

Tipos de camiones	TRAFICO	Ejes equivalentes	Acumulados	Nivel de confiabilidad ( R)	Desviación estándar
Camiones de bajo volumen de tránsito	TP1	150001	300000	70%	-0.524
	TP2	300001	500000	75%	-0.674
	TP3	500001	750000	80%	-0.842
	TP4	750001	1000000	80%	-0.842
	TP5	1000001	1500000	85%	-1.036
	TP6	1500001	3000000	85%	-1.036
	TP7	3000001	5000000	85%	-1.036
	TP8	5000001	7500000	90%	-1.282
Resto de camiones	TP9	7500001	10000000	90%	-1.282
	TP10	10000001	12000000	90%	-1.282
	TP11	12000001	15000000	90%	-1.282
	TP12	15000001	20000000	90%	-1.282
	TP13	20000001	25000000	90%	-1.282
	TP14	25000001	30000000	90%	-1.282
	TP15		> 30000000	95%	-1.645

Nota: Fuente: MTC, 2013.

### 2.5.1.3 Serviciabilidad.

El rendimiento del pavimento puede medirse por su serviciabilidad, que está relacionada con la seguridad y la comodidad de los usuarios de la carretera (comportamiento funcional). También se ocupa de las propiedades físicas que pueden aparecer en el pavimento, como grietas, fisuras, etc., que pueden afectar a la capacidad de carga de la estructura (rendimiento estructural).

La serviciabilidad es una métrica subjetiva para evaluar las superficies de las carreteras, pero la tendencia es definirla mediante parámetros medibles como el índice de perfil de rodadura, el índice de rugosidad internacional, el coeficiente de fricción, la distancia de frenado, la visibilidad, etc.

**Tabla 2**  
**Calificación de la serviciabilidad**

Índice de Serviciabilidad (PSI)	Calificación
5 – 4	Muy buena
4 – 3	Buena
3 – 2	Regular
2 – 1	Mala
1 - 0	Muy mala

**Nota:** Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavements Structures 1993

La pérdida de serviciabilidad se define como la diferencia entre el índice de servicio inicial y final  $\Delta PSI = P_o - P_t$ .

**El Índice de Serviciabilidad Inicial (Po)**, Estado del pavimento inmediatamente después de la construcción. Para los pavimentos de hormigón, la AASHTO recomienda un valor de 4,5..

**El Índice de Serviciabilidad Final (Pt)**, se produce cuando el estado del pavimento deja de responder a las exigencias de confort y seguridad del usuario. La calificación de servicio esperada se basa en la importancia de la carretera y se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 3.**  
**Índice de serviciabilidad final.**

Clasificación	$P_t$
Autopistas	3.00
Colectores	2.50
Calles comerciales e industriales	2.25
Calles residenciales y estacionamientos	2.00

**Nota:** Fuente: AASHTO, Guide for Design of Pavements Structures 1993

#### **2.5.1.4 El suelo y el efecto de las capas de apoyo (Kc).**

Un parámetro que caracteriza el tipo de subrasante es el módulo de reacción (K) del mismo. Además, se considera la posibilidad de mejorar el nivel de soporte de la subrasante mediante la incorporación de capas intermedias granulares o tratadas, lo que mejora las

condiciones de soporte y puede reducir con ello el espesor calculado del concreto. Esta mejora está representada por el módulo de reacción combinado (Kc)

El objetivo de la prueba del módulo de reacción de la subrasante, también conocida como prueba de la placa, es determinar la presión necesaria para lograr una deflexión determinada, en este caso de 13 mm. El ensayo está normado en ASTM D 16 - 1196 y AASHTO T- 222. Las unidades de K son Mpa/m.

Es posible, sin embargo, utilizar la alternativa proporcionada por la AASHTO a través de algunas relaciones directas que permiten el cálculo del coeficiente de respuesta k en función de la clasificación del suelo y del CBR; en este sentido, se recomienda considerar las siguientes ecuaciones:

Si  $CBR > 10\%$ , entonces:

$$K = 46 + 9.08 \times (\text{Log}(CBR))^{4.34}, \text{ en Mpa / m}$$

Si  $CBR < 10\%$ , entonces:

$$K = 2.25 + 52.5 \times (\text{Log}(CBR)), \text{ en Mpa / m}$$

El valor de K combinado será finalmente:

$$K_c = \left[ 1 + \left( \frac{h}{3.38} \right)^2 \times \left( \frac{K_1}{K_0} \right)^{2/3} \right]^{0.5} \times K_0$$

Donde:

K1 (kg/cm<sup>3</sup>) : Coeficiente de reacción de la sub base granular

Kc (kg/cm<sup>3</sup>) : Coeficiente de reacción combinado

K0 (kg/cm<sup>3</sup>) : Coeficiente de reacción de la subrasante

h (cm) : Espesor de la sub base granular

### **2.5.1.5 Resistencia a flexo tracción del concreto (Mr).**

El módulo de ruptura (Mr) está normalizado según la norma ASTM C-78. Cuanto mayor sea el Mr, menor será el espesor del pavimento.

El valor mínimo de Mr para los pavimentos de carreteras es Mr = 40 kg/cm<sup>2</sup>, lo que da un valor de compresión de f'c = 280 kg/cm<sup>2</sup> a una relación agua/cemento de 0,5. Este valor no lo determina la AASHTO, sino que depende de la tecnología del material para resistir el desgaste provocado por los neumáticos. No se recomienda el hormigón con Mr > 50 kg/cm<sup>2</sup> ya que hace que las capas superficiales sean demasiado rígidas. El módulo de rotura del hormigón (Mr) se correlaciona con el módulo de compresión del hormigón (f'c) mediante la siguiente regresión:

$$M_r = a\sqrt{f'c} \quad , \text{valores en kg / cm}^2 \text{ según el ACI 363}$$

Es conveniente recalcar que el  $M_r$  es el parámetro de diseño para AASHTO 93.

### 2.5.1.6 Modulo elástico del concreto (E).

En el concreto, su módulo de elasticidad (E) es un valor especialmente importante en el diseño de estructuras de concreto armado. Se puede predecir a partir de la resistencia a la compresión o a la flexión, utilizando correlaciones conocidas. En el caso de los concreto de con resistencias a la compresión superiores a  $f'c > 400 \text{ kg/cm}^2$  , la estimación mediante las fórmulas propuestas por los distintos códigos puede ser incierta, ya que hay variables que no se tienen en cuenta y que, por tanto, están sujetas a continuos ensayos y ajustes.

AASHTO 1993 indica que el módulo elástico puede ser estimado usando una correlación recomendada por el American Concrete Institute (ACI):

$$E = 57000 x (f'c)^{0.5} \quad , (f'c \text{ en psi})$$

El ensayo ASTM C - 469 calcula el módulo de elasticidad del concreto

### 2.5.1.7 Drenaje.

La presencia de agua o humedad en la estructura del pavimento provoca los siguientes problemas:

- Erosión del suelo por migración de partículas.
- Reblandecimiento del sustrato debido a la saturación prolongada, especialmente durante las heladas.
- Deterioro del material de la capa superficial debido a la humedad.
- Deformación y agrietamiento creciente debido a la pérdida de capacidad portante de la estructura.

La metodología de diseño de la AASHTO 93 incluye un coeficiente de drenaje (Cd) que debe considerarse en el diseño. El coeficiente de drenaje Cd varía entre 0,70 y 1,25 en función de las condiciones mencionadas anteriormente. Un valor alto de Cd indica un buen drenaje, que beneficia a la estructura y reduce el espesor del concreto a calcular.

**Tabla 4.**  
**Valores recomendados del coeficiente de drenaje Cd**

Cd	Tiempo que tarda el agua en ser evacuada	Porcentaje de tiempo en que la estructura del pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación			
		<1%	1 – 5%	5 - 25%	>25%
<b>Calificación</b>					
Excelente	2 horas	1.25 – 1.20	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10
Bueno	1 día	1.20 – 1.15	1.15 – 1.10	1.10 – 1.00	1.00



<i>Mediano</i>	<i>1 semana</i>	<i>1.15 – 1.10</i>	<i>1.10 – 1.00</i>	<i>1.00 – 0.90</i>	<i>0.90</i>
<i>Malo</i>	<i>1 mes</i>	<i>1.10 – 1.00</i>	<i>1.00 – 0.90</i>	<i>0.90 – 0.80</i>	<i>0.80</i>
<i>Muy malo</i>	<i>Nunca</i>	<i>1.00 – 0.90</i>	<i>0.90 – 0.80</i>	<i>0.80 – 0.70</i>	<i>0.70</i>

**Nota:** Fuente: MTC-2013.

### **2.5.1.8 Transferencias de cargas (J).**

Las cargas deben transferirse eficazmente de una losa a otra para minimizar las deformaciones en las juntas. Las deflexiones excesivas provocan el bombeo de la subestructura y el posterior fallo de la losa de concreto.

Dentro del método AASHTO, se tiene coeficiente de transferencia de cargas J. La eficacia de la transferencia de cargas de una losa a otra depende de varios factores: el volumen de tráfico, el uso de juntas de transición y la presencia de apoyos laterales de la losa (Sardinell).

**Tabla 5.**

**Valores de coeficiente de transmisión de cargas J**

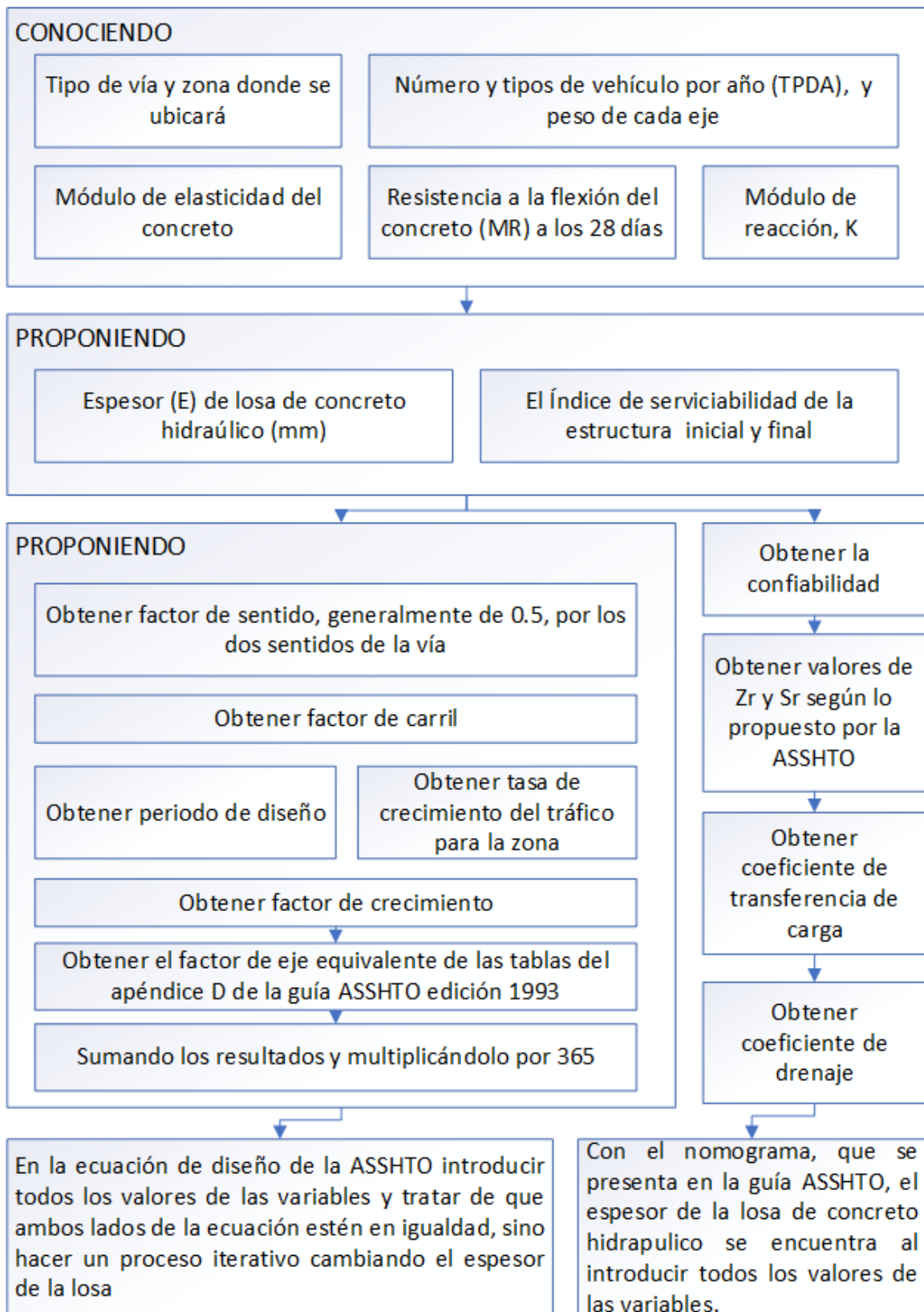
Tipo de Berma	Asfáltica		CONCRETO	
	SI	NO	SI	NO
Pasajuntas				
Valores J	3.2	3.8 – 4.4	2.8	3.8

**Nota:** Fuente: MTC, 2013.

Se recomienda el uso de pasajuntas cuando:

- *El tráfico pesado representa más del 25% del tráfico total.*
- *El número de EE supera los 5,0 millones de Esals.*

**2.5.1.9 Flujograma de diseño AASHTO 1993.**



**Figura 2. Flujograma de diseño utilizando el método AASHTO 1993.  
[Fuente: Guide for Design of Pavement Structures 1993]**

## **2.6 Pavimento tipo TCP**

### **2.6.1 Filosofía del diseño TCP.**

La construcción de losas cortas en pavimentos de concreto es otra alternativa técnica a la construcción de pavimentos rígidos, siendo la reducción de los esfuerzos de flexión en las losas de la estructura del pavimento una base esencial para el diseño de la estructura.

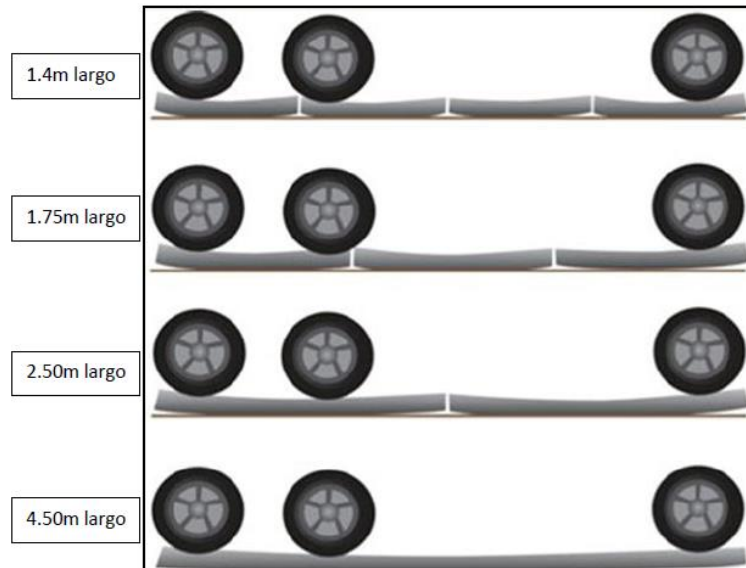
Se llegó al diseño TCP empezando por un concepto simple; se deben dimensionar las losas de tal forma que, cada losa sea cargada solamente por una rueda o por un set de ruedas, de este modo las losas no sean sobrecargadas, gracias a este concepto, se llegó a demostrar mediante en AASHTO Roas Test, el cual fue realizado por la Universidad de ILLINOIS (EE.UU.), donde se realizó un modelo a escala real de una vía con este pavimento, de manera que se pueda observar y supervisar el comportamiento real ante el tráfico.(Covarrubias, 2012)

La tecnología TCP propone sustituir las losas convencionales de los pavimentos (AASHTO) por un sistema de losas con una geometría optimizada que permite una distribución más eficaz de las cargas para evitar los problemas de agrietamiento. Las dimensiones típicas de las losas son de 3,5 m de ancho y 4 m de largo, lo que significa que gran parte de la carga del vehículo se concentra en la losa y provoca tensiones, lo que se evita con el método TCP, cuyas losas no soportan más que un juego de ruedas de camión a la vez.

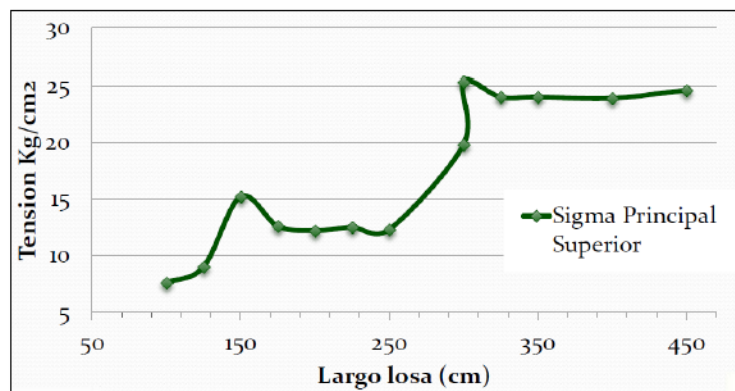
El concepto de diseño TCP consiste en que cada losa se carga al máximo con un par de ruedas a la vez. Esto reduce significativamente las tensiones en la losa, ya que con esta configuración de cargas y dimensiones no hay "aplanamiento" de las losas, y cada losa soporta la carga bajo las ruedas y se apoya en el suelo. Es importante comprender el comportamiento de los pavimentos de concreto.

Esta geometría de losa entra en conflicto con los criterios de diseño. Debido a esta naturaleza de la losa, las cargas de los camiones provocan tensiones de tracción en la superficie superior. Las dimensiones de las losas tienen una gran influencia en las tensiones del concreto, que son la causa de las fisuras por fatiga. También influye la posición de las ruedas en las losas. Esta combinación de la posición de las ruedas y la geometría de la losa es la principal característica de este tipo de pavimento.(Covarrubias, 2012)

Para cumplir esta condición, la losa debe estar dimensionada de manera que, en un vehículo estándar, cada rueda o conjunto de ruedas entre en una losa a la vez. Como hay diferentes tipos de vehículos, se diseña para el tipo más dañino, a no ser que se conozca el tráfico y se diseñe para el tipo de vehículos que utilizarán la carretera con más frecuencia.



**Figura 6. Comparación de cargas de vehículos de diseño**  
**Fuente: Tesis, O. Estación y O. Valverde (2012)**



**Figura 7. Comparación de tensión vs dimensión de losa**  
**Fuente: Tesis, O. Estación y O. Valverde (2012)**

La reducción de las tensiones en la parte superior de la losa da lugar a una mayor vida útil de la misma, o lo que es lo mismo, se puede reducir el grosor de la losa para conseguir las mismas tensiones y vida útil que con el método de construcción convencional. Es en el último caso donde las tensiones generadas por las cargas son menores, donde por ende se puede utilizar un menor espesor de concreto. (Cervantes, 2013).

Si se considera un camión "normal" con un solo eje delantero de una rueda y un doble eje trasero de dos ruedas, es posible optimizar el diseño del grosor de la losa del pavimento de concreto. En este camión, la reducción de la longitud de la losa de 4,5 m a 1,8 m se

traduce en una reducción del espesor de 6 a 10 cm para la misma tensión de la losa de concreto. La anchura de la losa corresponde a la mitad de la vía.

## 2.6.2 Concepto de diseño de losa TCP.

El concepto general de las losas delgadas de concreto es que, al reducir los esfuerzos de tensión en el pavimento, se logra una reducción en el espesor de la losa.

Los esfuerzos de tracción en una losa de concreto son una función de las condiciones ambientales y de la carga. Estas tensiones de tracción se reducen al cambiar el tamaño de la losa de un típico 4,50 m x 3,60 m a aproximadamente 1,80 m x 1,80 m.

Con la menor dimensión de la losa propuesta por el método TCP, la losa sólo es cargada por una rueda en cualquier momento y situación. Las tensiones críticas en la superficie de la losa cuando se aplican cargas axiales en ambas direcciones a losas típicas de aproximadamente 3,60 x 4,50 m se calcularon como se muestra en la tabla siguiente.

**Tabla 6.**  
**Resultados dimensiones de la losa vs Esfuerzo máximo.**

ESFUERZO MAXIMO (KG/CM2)	DIMENSIONES DE LA LOSA		
	Longitud (m)	Ancho (m)	Espesor (m)
25.035	4.50	3.60	0.25
24.613	2.50	1.80	0.14
25.105	1.80	1.80	0.16
24.824	1.40	1.80	0.13

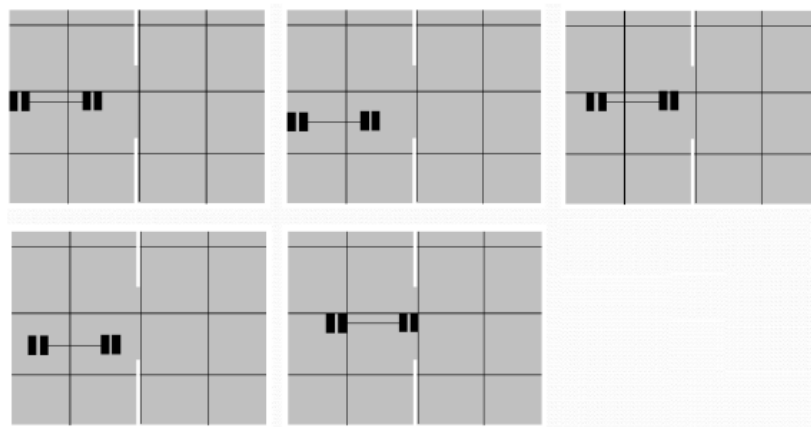
**Nota:** Fuente: Illonis Center for Transportation. Performance of Concrete Pavements with optimized slab geometry, (2009).

La geometría de la losa (tamaño y espesor) se modificó para conseguir tensiones de tracción similares. Al reducir el tamaño, la carga y las tensiones se reducen, de modo que el espesor de la losa necesario para un nivel de tensión determinado es mucho menor..

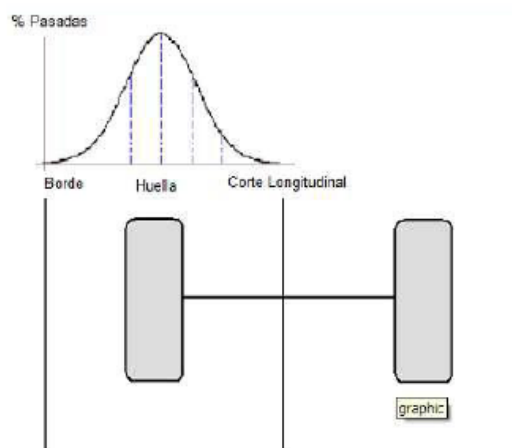
A medida que se reducen las dimensiones y los espesores de las losas, las deflexiones del pavimento aumentan significativamente, lo que hace que el riesgo de bombeo, erosión y deformación permanente de las capas de sub-base y base sea crítico. Al igual que el método PCA para pavimentos rígidos, muestra que, para un espesor de losa dado, se puede alcanzar una vida a fatiga infinita, pero la erosión o el bombeo pueden ser el factor determinante.

En consecuencia, la geometría de losa más pequeña del diseño del TCP requiere una atención especial durante la fase de diseño y construcción, con especial atención al diseño y especificación de las capas de la subestructura y el sistema de conexión, que se discutirá más adelante.

Utilizando la prueba de carretera de la AASHTO, se determinaron las siguientes posiciones de carga según las pruebas a escala real realizadas. Estas son las zonas donde la fatiga es mayor y el componente muestra una respuesta más fuerte, por lo que el análisis a realizar corresponde a estas posiciones de carga y se selecciona el modelo estructural con mayor respuesta.



**Figura 8. Posiciones de ejes de ruedas en un área de pavimento**



**Figura 9. Porcentaje de pasadas sobre cada lugar en las losas, que genera el mayor daño por fatiga**

### 2.6.3 Características principales del diseño TCP

A continuación, presentamos una serie de características propias de un pavimento de losas cortas TCP: (Covarrubias, 2012)

- Losas pequeñas (media pista x 1,20 a 2,5 m)
- Base granular (finos < 8%), base asfáltica o BTC
- Geotextil entre sub rasante y base, si es necesario
- Corte de juntas delgado (1,9mm- 2,5mm)
- No requiere sello de juntas
- No requiere barras de transferencia de cargas ni de amarre entre pistas (salvo juntas construcción)
- Confinamiento lateral.
- Este tipo de pavimento es conocido como pavimento “verde”, por:
  - Menor Consumo de energía durante la construcción (menor traslado de material).
  - Menor consumo de cemento (Más delgado).
  - Menor consumo de energía para la iluminación (30% con respecto a pavimentos oscuros).
  - Menor consumo de combustible durante el funcionamiento
  - Durabilidad (concreto no se degrada en el tiempo)
  - Menor temperatura durante el funcionamiento (no absorbe la radiación solar).
  - Evitar los retrasos en el mantenimiento.
  - *No hay costes de mantenimiento de las juntas.*
  - Fácil sustitución de los paneles.

## **2.6.4 Especificaciones técnicas del pavimento TCP.**

### **2.6.4.1 Subbase granular.**

La capa de subbase del pavimento tendrá un espesor de 150 mm y un valor de CBR superior al 80 % para los pavimentos de menos de 12 cm de espesor y un valor de CBR entre el 50 % y el 80 % para los pavimentos más gruesos, según el diseño. Será granular y tendrá un contenido de partículas finas inferior al 6 %. No se colocará ningún material impermeable entre la subbase y las losas de concreto. La subbase no se mojará antes de la colocación del concreto, a menos que el riego se utilice para reducir la temperatura en verano. Si la subrasante es de grano fino, debe colocarse un geotextil entre la subrasante y la subbase para evitar el paso de los finos.

Esto debe cumplir los requisitos:

- Resistencia a la tracción > 500N
- Resistencia a la perforación > 300N
- Apertura de poros <= 0,149 mm

#### **2.6.4.2 Concreto.**

Para la construcción, el concreto deberá tener una resistencia mínima a la flexotracción bajo carga (según diseño) de 4,5 a 5,2 MPa después de 28 días con un nivel de confianza del 80% y un tamaño máximo de agregado de 40 o 20 mm (40 mm para espesores de 12 cm o mayores).

El slump debe ser de 5 cm a 7 cm cuando se utiliza tren pavimentador y de 8 cm a 14 cm cuando se utilizan cerchas y vibradores manuales.

**Membranas de curado:** Se deben utilizar dos tipos de membranas:

- **Retardador de evaporación:** *La mezcla utilizada debe ser capaz de formar una película anti evaporación sobre el agua que escapa del hormigón.*
- **Membrana de Curado Tradicional.** *Se aplica una vez seca la superficie del concreto.*

#### **Confinamiento lateral (estacas).**

Dos barras de 16 mm de diámetro por losa deben colocarse verticalmente en el exterior de las losas. La longitud de estas barras debe ser de al menos 40 cm, pero lo suficientemente larga para garantizar un buen anclaje en el suelo (la longitud depende del tipo de suelo). La punta está a 50 cm de la junta y se pega a la losa de concreto. La finalidad de estas barras es evitar que las losas se desplacen lateralmente. Otra posibilidad es que el contorno de la regla esté limitado por elementos externos, como las soleras de los bordes. Estas soleras se apoyan de nuevo en la losa y sobre ellas debe colocarse el relleno lateral compactado.

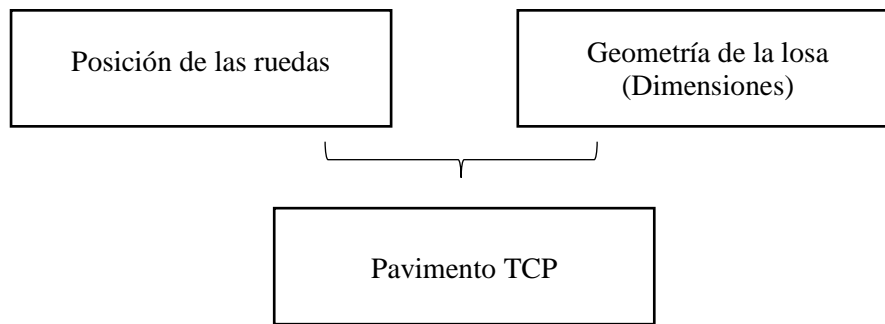
#### **Corte de Juntas:**

Las juntas longitudinales y transversales de contracción en el pavimento deben cortarse tan pronto como la cortadora de concreto pueda colocarse sobre la banda de rodadura sin dejar marcas (aproximadamente 6 horas). El endurecimiento del concreto y la temperatura ambiente deben tenerse en cuenta a la hora de determinar el momento de cortar las juntas, que debe hacerse lo antes posible para evitar el retraso de la fisuración y reducir las tensiones de deformación en las losas.

El corte debe realizarse con una sierra fina de 1,9 mm de ancho para evitar la entrada de partículas nocivas en la junta.



### 2.6.5 Diseño de losas cortas TCP.



**Figura 3. Concepto del diseño de losas optimizadas**

El concepto general de las losas TCP es que, al reducir las tensiones de tracción en el pavimento, se consigue un menor espesor de la losa. Los esfuerzos de tracción en la losa de concreto están en función de las condiciones ambientales y de la carga. Estos esfuerzos de tracción se reducen al cambiar las dimensiones de la losa de los 4,50 m x 3,60 m habituales a aproximadamente 1,80 m x 1,80 m. El diseño TCP permite que sólo una rueda cargue la placa en cualquier momento o situación. (Covarrubias, 2012)

### 2.6.6 Metodología de diseño de losas cortas TCP.

El nuevo concepto del diseño "TCP" es que cada losa del pavimento sea pisada, por un set de ruedas a la vez. Esto permite reducir significativamente las tensiones superiores de la losa, esta configuración de cargas versus las dimensiones de las losas, ya no produce el efecto de "planchado", debido a que cada losa soporta las cargas bajo las ruedas, apoyada en el suelo (Covarrubias, 2007).

#### 2.6.6.1 Modelación del suelo.

Un aspecto importante del diseño del TCP es la modelización del suelo. Hasta ahora se asumía que las losas de concreto son lo suficientemente resistentes para soportar las cargas de los vehículos y no los esfuerzos cortantes. En el caso de las losas más gruesas, deben utilizarse capas de base más blandas (20%-50% CBR) para aumentar el agarre de la losa al suelo. Cuando se utilizan losas más pequeñas, este efecto es menos relevante debido a los voladizos más pequeños. Cuando se utilizan losas de menos de 12 cm de espesor, la subestructura debe ser más rígida para generar tensiones de punzonamiento bajo las ruedas y soportar las cargas que las atraviesan. Por lo tanto, si éstas tienen menos de 12 cm de espesor, la subestructura debe ser lo suficientemente rígida (CBR>80%) para soportar estas cargas (Covarrubias, 2007).

## 2.6.7 Factores y parámetros para el diseño de losas cortas.

### 2.6.7.1 Largo de la losa.

Para dimensionar losas que solo puedan contener un set de ruedas, con la finalidad de que el concreto trabaje a compresión y no a flexión es necesario definir el largo de la losa, según los criterios siguientes:

- 140 cm : caso donde el eje tandem queda en losas distintas.
- 180 cm: caso donde el eje tandem queda en la misma losa.
- 220 cm : caso donde el eje tandem queda en el centro de una losa y en borde de otra.

Para pavimentos de tránsito y clima normal se recomiendan losas de 220 cm de largo. Para climas extremos (gradientes térmicos altos) o tránsitos en más de una dirección se recomiendan losas de 180 cm de largo. El ancho de las losas deberá ser media pista (175 cm) y deberá considerar las condiciones de borde con que se diseñe. (Covarrubias, 2012)

### 2.6.7.2 Tensiones en el concreto.

Las tensiones en el concreto se presentan en diferentes condiciones, pueden ser: alabeo, espesor, tipo de carga, tipo de gráfico; estos se evalúan en los lugares más críticos de la losa.

#### Número de pasadas admisibles

Calcular el número máximo de pasadas, dadas las tensiones máximas generadas. Se puede emplear los modelos de verificación por fatiga de PCA 84 o mejor aún los indicados en MEPDG 2008.

#### Ecuación 2. Número de pasadas admisibles

$$\log(N_{ijkl}) = 2 \times \left( \frac{C_3 \times \sigma_{ijkl}}{MOR \times C_1 \times C_2} \right)^{-1.22}$$

Donde:

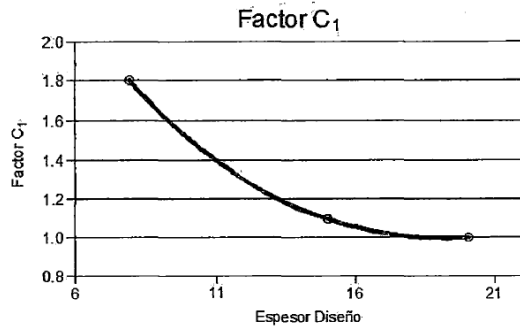
$N_{ijkl}$  : Número de pasadas admisibles para posición del eje  $k$ , condición de alabeo  $i$

y condición de carga  $j$ , superior o inferior

$\sigma_{ijkl}$ : Tensión principal máxima calculada para posición del eje  $k$ , condición de alabeo  $i$ , condición de carga  $j$ , superior o inferior

$MOR$  : Resistencia a la flexotracción media a 90 días

$C_1$  : Factor de calibración por geometría y espesor de la losa, determinado según la (figura 9)



**Figura 4. Factor C1.**  
**Fuente: TCPavements**

*C2* : Factor de calibración por uso de fibras estructurales en concreto, si no se usan fibras el valor sera 1, en caso contrario sera determinado según:

$$C2 = \left( 1 + \frac{R_{3,e}}{100} \right)$$

$R_{3,e}$  =Razón equivalente de resistencia residual a 3 mm de flecha en ensayo de viga en aire.

*C3* :Factor por tipo de borde (se utiliza sólo en posiciones de borde) (Ver la tabla Tabla 12)

### 2.6.7.3 Daño de fatiga en un punto determinado.

Utilizando la hipótesis de Miner, se determina el daño por fatiga para cada posición en la parte superior e inferior de la losa basándose en la siguiente fórmula:

#### **Ecuación 3. Hipótesis de Miner**

$$FD_k = \sum_i \frac{n_{ijk}}{N_{ijk}}$$

Donde:

$FD_k$  : Daño por fatiga para una posición determinada del eje  $k$

$n_{ijk}$  : Número de pasadas para la tensión local para condición  $i,j,k$

$N_{ijk}$  :Número de pasadas permitidas para la tensión local para condición  $i,j,k$

$i$  :Condición de alabeo

$j$  :Condición de carga

$k$  : Posición eje

### **Porcentajes de losas agrietadas para un 50 % de confiabilidad**

El porcentaje de losas agrietadas se determinan para el 50% de confiabilidad para cada posición superior e inferior, basado en MEPDG daño causado por fatiga en el modelo de agrietamiento.(ARA, 2007)

$$\%Crack_{kl} = \frac{1}{1 + FD_{kl}^{-1.98}}$$

Donde:

$\%Crack_{kl}$  = Porcentaje de losas agrietadas en posición del eje k

$FD_{kl}$  = Daño por fatiga con eje en la posición k y ubicación de esfuerzo l

### **Cálculo del porcentaje de losas agrietadas totales, fibra superior e inferior**

$$Tcrack_t = MAX (\%Crack_{kl})$$

### **Cálculo del porcentaje de losas agrietadas final 50 % de confiabilidad**

Combinando el agrietamiento desde cada posición para determinar el total de fisuras en el pavimento para el 50 por ciento de confiabilidad:

$$TTCracks50 = Tcracksi + Tcrackss - Tcracksi * Tcrackss$$

Donde:

TTcracks50 = % total de losas fisuradas, 50% de confiabilidad:

Tcracksi = % losas fisuradas desde la superficie

Tcrackss = % losas fisuradas desde parte inferior

### **Cálculo confiabilidad porcentajes de losas agrietadas**

La Confiabilidad es determinada con la misma metodología que el MEPDG (ARA 2007) y se presenta a continuación:

$$TTcracks_m = TCracks_{50} \times Z_r \times S_e$$

$$S_e = (5.3116 \times TCracks_{50}^{0.3903}) + 2.99$$

Donde:

TTcracksm = % losas agrietadas, m % confiabilidad

TTcracks50 = % total de losas agrietadas, 50% confiabilidad

$Z_r$  = Coeficiente normal estándar para un nivel de confianza dado.

$S_e$  : Error estándar.

## **2.7 Método TCP para el diseño de pavimento**

A continuación se presentan valores y datos necesarios para calcular un espesor requerido.

### 2.7.1 Posición de daño crítico.

Se tiene que identificar las posiciones en donde circulan los ejes de los vehículos, mismos que vienen a ser cargas cíclicas y repetitivas. Todo este proceso genera daño por fatiga debido a la cantidad de pasadas que se generan en todos los ciclos de carga.

$$N^{\circ} \text{ de ciclos de carga} = F_u \times EE$$

$$N^{\circ} \text{ de ciclos de carga tandem} = EE \times F_u \times (\% \text{ Ejes Tandem} + 2 \times \% \text{ Ejes Tridem})$$

Ecuación 4. Fórmula para calcular el número de ciclos de carga

**Tabla 7.**  
**Porcentaje de pasadas**

POSICION	PASADAS (%)
Borde	8 %
Huella (40 cm borde)	30 %
Corte longitudinal	8 %

**Nota:** Fuentes: Covarrubias (2007)

### 2.7.2 Tránsito

Para el método TCP se necesita determinar lo siguiente:

#### 2.7.2.1 Ejes equivalentes solicitantes.

El tránsito que se tiene en la vía, genera Ejes equivalentes (EE) los cuales se tienen que proyectar y acumular en un periodo de vida de diseño. Está sollicitación de carga ejercerá el principal factor de diseño de la estructura del pavimento.

#### 2.7.2.2 Distribución de ejes.

El valor se expresa como porcentaje de los ejes equivalentes generados por cada tipo de eje.

Si no se dispone de esta información los valores a utilizar son los que se indican en la Tabla 8 (deben sumar 100%). Para tránsitos menores a un millón de ejes equivalentes y en caso que no se disponga de esta información, se debe considerar una distribución de 50 % para (ESRS) y 50% para (ESRD).(Covarrubias, 2007)

**Tabla 8.**  
**Distribución de ejes**

Tipo de eje	Distribución de ejes (%)
Eje simple rueda simple ESRS	20%
Eje simple rueda doble ESRD	40%
Eje doble rueda doble EDRD	30%
Eje triple rueda doble ETRD	10%

**Nota:** Fuente: Dirección de Vialidad (2012)

### **2.7.2.3 Sobrecarga.**

El método tiene incluida las posibles sobrecargas en los ejes ya que, como factor de seguridad, evalúa no solo el ESRD estándar si no que también evalúa un ESRD con un 20% de sobrecarga tomado en cuenta las posibles interacciones que pueda existir por este efecto. En caso de existir sobrepeso mayor a lo señalado, se recomienda considerar un 10% de sobrecarga para un diseño seguro.(Covarrubias, 2007)

### **2.7.3 Porcentaje de Losas Agrietadas (TTcracks).**

Debe tenerse en consideración que este parámetro solo determina un umbral de daño en un tiempo determinado y no necesariamente la vida útil del pavimento. En la Tabla 9 se encuentran los valores recomendados para el porcentaje de losas agrietadas.

**Tabla 9.**

#### ***Daño admitido (TTracks)***

Clasificación del camino	Losas agrietadas %
Vías principales y auto pistas	10 – 20
Vías colectoras	10 – 30
Caminos secundarios	30 - 50

**Nota:** Fuente: Dirección de Vialidad 2012.

### **2.7.4 Confiabilidad.**

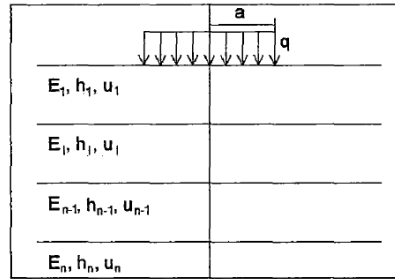
El factor de confiabilidad (M) que es función de un valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal (Zr) y de la desviación normal del error combinado (Se) de todos los parámetros que intervienen en el comportamiento del pavimento.

### **2.7.5 Módulo de reacción de la subrasante.**

El módulo de reacción de la subrasante, k (Mpa/m) es el parámetro que se utiliza para caracterizar la capacidad de soporte de la subrasante.

#### ***2.7.5.1 Método de cálculo del valor de k para un sistema multicapas.***

Si el diseño se realiza considerando un sistema multicapas, como el mostrado en la Figura N°11 el módulo de reacción de este sistema se determina aplicando el método KSEM, el cual modela el ensayo de placa de carga.



**Figura 5. Porcentaje de pasadas sobre cada lugar en las losas**  
**Fuente: Dirección de Vialidad (2012)**

$$k = \frac{0.0167087 \times E_n}{(1-u^2) \left[ \frac{1 - \frac{E_n}{S}}{1 + \left( \frac{h_1 + h_2 + \dots + h_n}{38.1} \right)^2 \left( \frac{S}{E_n} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{2}} + \frac{E_n}{S}}$$

Donde:

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

$S$  : Módulo equivalente (kg/cm<sup>2</sup>)

$E_i$  : Módulo de la elasticidad de la capa  $i$  (kg/cm<sup>2</sup>)

$h_i$  : Espesor de la capa  $i$  (cm)

$u$  : Relación de Poisson de la capa  $n$

### 2.7.6 Propiedades del concreto.

Se deben definir las siguientes propiedades del concreto:

#### 2.7.6.1 Resistencia a la flexotracción.

Para el modelo se utiliza la resistencia media a la flexotracción a 90 días con un 20 % de fracción defectuosa, valor con el que se debe diseñar el pavimento. (Covarrubias, 2007)

Se recomienda los valores que se indican en la Tabla 10.

**Tabla 10.****Resistencia a la flexotracción característica (80 %)**

Tipo de vía	Resistencia a la flexotracción características a 90 días (Mpa)	
	Rango	Recomendado
Vías principales y autopistas	5.0 – 5.5	5.3
Vías colectoras	4.6 – 5.5	5.3
Caminos secundarios		
Caminos secundarios	4.6 – 5.3	5.0

*Nota: Fuente:* Dirección de vialidad (2012)

**2.7.6.2 Módulo de elasticidad de concreto.**

Para el módulo de elasticidad del concreto de características normales se recomienda utilizar el valor de 29,000 Mpa. Si no se tienen valores obtenidos por resistencia de concreto a 90 días. (Covarrubias, 2007)

**2.7.6.3 Módulo de Poisson, coeficiente de dilatación térmica y retracción a 365 días.**

Cuando no se disponga de información se recomienda utilizar para los diseños los valores indicados en la tabla Tabla 11.

**Tabla 11.****Parámetros de diseño**

Parámetros	Valor
Módulo de poisson	0.15
Coeficiente de dilatación térmica (1/°C)	0.00001
Retracción a 365 (m/m)	0.001

*Nota: Fuente:* Dirección de Vialidad (2012)

**2.7.7 Factores de borde por tipo de ajuste.**

Se define como borde, aquel que es adyacente por el exterior a una pista de 3.5 metros de ancho. Los tipos de borde aplicables a esta tecnología son los que se indican a continuación y los factores a considerar en cada caso se indican en la Tabla 12.

**Tabla 12.****Factores de ajuste por tipo de borde**

Tipo de borde	Factor de ajuste (C <sub>3</sub> )
Libre	1.00
Berma granular	0.95
Berma asfáltica	0.90
Berma de concreto	0.85
Sobreancho	0.80
Vereda	0.80

*Nota: Fuente:* Dirección de Vialidad (2012)



### 2.7.8 Alabeo.

Debido a que los pavimentos cambian su condición de alabeo continuamente, el TCP considera este cambio como porcentaje del tiempo en el año con condiciones de alabeo cada 5 °C. El valor utilizado es un gradiente térmico que equivale a la suma de alabeos generados en la losa (térmicos, hidráulicos, y de construcción).(Covarrubias, 2007)

$$\Delta T^{\circ} = \Delta T_c^{\circ} + \Delta T_d^{\circ}$$

Ecuación 5. Alabeos equivalentes

Donde:

$\Delta T^{\circ}$  : Gradiente térmico equivalente (°C)

$\Delta T_c^{\circ}$  : Gradiente térmico equivalente de construcción (°C)

$\Delta T_d^{\circ}$  : Gradiente térmico por variación de temperatura (°C)

### 2.7.9 Esfuerzos de alabeo.

Una de las solicitaciones a las que se ven sometidas las losas es el alabeo. Como ya se señaló, éste tiene una componente debida al gradiente de temperatura, otra de humedad y finalmente una de construcción, según (Ministerio de Vivienda y Urbanismo, 2008)

Para determinar el diferencial de temperatura positivo o negativo se utiliza la siguiente ecuación:

$$\Delta T(+) = 12.33 - \frac{2385.715}{D} + 0.707 * WIND + 0.596 * TEMP - 5924.10^{-4} * PRECIP$$
$$\Delta T(-) = -28.62 - \frac{2387.987}{D} + 0.817 * WIND + 0.227 * TEMP + 0.0002884 * PRECIP$$

Ecuación 6. Diferencial de temperatura positivo asociado a alabeo convexo y cóncavo

Donde:

$\Delta T(+)$  : Diferencial de temperatura positivo asociado a alabeo convexo (°C)

$\Delta T(-)$  : Diferencial de temperatura negativo asociado a alabeo cóncavo (°C)

$D$  : Espesor de la losa (mm)

$WIND$  : Velocidad media anual del viento (nudos)

$TEMP$  : Temperatura media anual del ambiente (°C)

$PRECIP$ : Precipitación media anual (mm)

Cabe señalar que los gradientes que se obtienen a lo largo del país, con estas ecuaciones, pueden no ser totalmente representativos debido a que la relación empleada, es originaria de los Estados Unidos (sólo ha sido traspasada a las unidades de medida nacional) y su alcance y campo de aplicación directo, es el método AASHTO 1998.

Con respecto al alabeo debido a humedad y construcción se emplea la recomendación dada por AASHTO 1998, tomando un promedio de los valores recomendados, es decir,

0,033 (°C/mm). Cabe destacar que este valor sólo se empleará en el caso de gradiente por temperatura negativo, ya que así se establece en la guía AASHTO 1998.

### 2.7.10 Transferencia de carga.

La transferencia de cargas depende en gran medida de las posibilidades de interacción estructural de las losas vecinas. En los pavimentos de concreto convencionales sin losas de transferencia de carga, la transferencia de carga se consigue mediante la unión mecánica de los áridos.

Los valores recomendados se indican en la Tabla 13.

**Tabla 13.**  
**Transferencia de carga**

Condición	Transferencia de carga ( %)
Transferencia de carga baja (árido de mala calidad )	30
Transferencia de carga normal (valor recomendado para el diseño)	50
Transferencia de carga alta (con barras de traspaso de cargas)	70

*Nota:* Fuente: Dirección de vialidad, (2012)

### 2.7.11 Índice de rugosidad internacional (IRI).

El método considera los estados de serviciabilidad inicial y final del pavimento. El estado inicial esta dado por el IRI al momento de la puesta en servicio del camino, el cual depende de la calidad de la construcción que se utilice. El estado final está dado por el valor de IRI al final de la vida del diseño.(Covarrubias, 2012)

Los valores recomendados se indican en la Tabla 14.

**Tabla 14.**  
**Índice de rugosidad internacional**

IRI inicial	2.0
IRI Final	3.5

*Nota:* Fuente: Dirección de Vialidad (2012)

### 2.7.12 Características de la subrasante.

La subrasante es el fondo de la excavación en terreno natural que soportará la estructura del pavimento y debe estar constituida por suelos seleccionados de características aceptables para formar un cuerpo estable en condiciones óptimas, para que no sea afectado por las cargas de diseño provenientes del tránsito.

Su capacidad de soporte en condiciones de servicio, junto con el tránsito y las características de los materiales de construcción de la superficie de rodadura, constituyen las variables básicas para el diseño de la estructura del pavimento que se colocara encima.

En la etapa constructiva, los últimos 0.30m de suelo debajo del nivel superior de la subrasante, deberán ser compactados al 95% de la máxima densidad seca obtenida del ensayo de Proctor modificado. (MTC, 2014).

Los suelos por debajo del nivel superior de la subrasante, en una profundidad no menos de 0.60m, deberán ser suelos adecuados y estables con CBR  $\geq$  6%. (Covarrubias, 2012)

En caso de que el suelo, debajo del nivel superior de la subrasante tenga un CBR  $<$  6% (sub rasante pobre o subrasante inadecuada), corresponde estabilizar los suelos, para los cual el Ingeniero responsable analizara según la naturaleza del suelo alternativas de solución, como la estabilización del suelo, o la elevación de la rasante, eligiéndose la más conveniente técnica y económica. (MTC, 2014).

**Tabla 15.**  
**Categorías de Sub rasante**

Categorías de Sub rasante	CBR
S <sub>0</sub> : Sub Rasante inadecuada	CBR $<$ 3%
S <sub>1</sub> : Sub rasante insuficiente	3% $\leq$ CBR $<$ 6%
S <sub>2</sub> : Sub rasante regular	6% $\leq$ CBR $<$ 10%
S <sub>3</sub> : Sub rasante buena	10% $\leq$ CBR $<$ 20%
<b>S<sub>4</sub>: Sub rasante muy buena</b>	20% $\leq$ CBR $<$ 30%
<b>S<sub>5</sub>: Sub rasante excelente</b>	CBR $\geq$ 30%

**Nota:** Fuente: MTC, 2014.



**Figura 6.** Esquema típico de un pavimento con una subrasante elevada.

### 2.7.13 Características de la subbase.

Debido a la naturaleza de un pavimento tipo TCP, tiene un requerimiento en la subbase con una exigencia mayor. Esta capa cumple dos funciones principales: la primera, debido al menor espesor del pavimento, aumentará la capacidad estructural del sistema; y la segunda, proveer una capa que no se erosione bajo la junta del pavimento. Por esto, el

material a utilizar dependerá del tránsito, espesor del pavimento y precipitaciones del lugar donde se realice el proyecto.(Covarrubias, 2012).

Se utilizará subbase granular CBR  $\geq$  80% en cualquiera de las siguientes condiciones:

- Pavimentos de espesor menor a 12 cm en toda condición de clima.
- Espesor de pavimento mayor o igual a 12 cm y precipitaciones mayores a 800 mm al año.
- Tránsito mayor a 25,000,000 EE.

En todos los demás casos, incluidos todos los pavimentos con fibra, se debe de diseñar con una subbase granular mínimo 120 mm de espesor compactado con un CBR = 50%. La cantidad de finos bajo la malla #200 no deberá ser mayor a 8 %.(Covarrubias, 2007)

#### **2.7.14 Geotextil.**

Se considera el uso de geotextil, para evitar contaminación proveniente de la subrasante con materiales finos. Se tiene que cumplir lo siguiente:

- Tránsito mayor a 1,000,000 EE.
- Precipitaciones mayores a 800 mm al año.
- Subrasante con C B R - 20%

El geotextil debe tener las siguientes propiedades mínimas.

- Resistencia a la tracción = 480 N
- Resistencia al punzonamiento = 290 N
- Abertura Aparente de Poros = 0.16mm
- Resistencia al Reventado = 950 KPa.

## **2.8 Marco normativo de la metodología TCP**

### **2.8.1 Respecto al área de suelos.**

#### **a) Para la subrasante:**

Este método solo contempla los datos que se logren obtener de campo (CBR real), por tanto deja a criterio de la normativa del país de origen el criterio a seguir. Aplicando dicha metodología en nuestro País, solo podemos recurrir al Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y pavimentos. 2014. La que contempla parámetros mínimos, los cuales ya se han referenciado líneas arriba en el inciso 2.7.12 Características de la subrasante.

### **b) Para la subbase**

Como se menciona líneas arriba en el inciso **2.7.13 Características de la subbase**; estos requerimientos vienen normados bajo **Design of concrete pavement with optimized slab geometry** la Metodología, (Covarrubias, 2012).

### **2.8.2 Respecto al concreto.**

Se toman como referencia a:

- Performance of concrete pavements with optimized slab geometry. Cervantes, 2009. University of Illinois at Urbana-Champaign Department Of Civil And Environmental Engineering 205 North Matthews
- Design of concrete pavement with optimized slab geometry la Metodología, (Covarrubias, 2012).
- Manual de Carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección Suelos y pavimentos. MTC 2014
- Manual de Carreteras. Volumen 5: Especificaciones técnicas generales de construcción. Y el Volumen 8: Especificaciones y métodos de muestreo, ensayo y control. Dirección de vialidad. Chile 2008.
- Manual Centroamericano para diseño de pavimentos. Agencia de los EEUU para el desarrollo internacional. 2002.

### **2.9 Variables de Entrada y Salida Del Software Optipave 2.0**

El software de Diseño Optipave 2, es un programa de diseño de losas con geometría optimizada (TCP). El programa calcula las tensiones en el pavimento, utilizando el concepto de estructura equivalente y redes neuronales. Para esto se necesitan ingresar los parámetros de diseño necesarios para poder realizar diseños del paquete estructural de un pavimento con esta herramienta. (TCPavements, 2013)

Los parámetros de diseño se pueden dividir en cinco categorías como se muestra a continuación.

- Parámetros de Diseño del Tipo de Pavimento
- Parámetros de Diseño del Tráfico
- Propiedades del Diseño del Concreto
- Parámetros del Suelo
- Clima

## 2.9.1 Parámetros de diseño del tipo de pavimento.

### 2.9.1.1 Proyecto.

Aquí se ingresan datos del nombre del proyecto, la localidad donde se ejecutará el proyecto, la fecha en la que se está haciendo el diseño, y una descripción breve del mismo.

### 2.9.1.2 Vida de Diseño.

La vida de diseño de un pavimento es el período durante el cual se espera que el pavimento se comporte según un determinado estándar de calidad. El rendimiento se estima a partir del momento en que la carretera se abre al tráfico. La vida útil puede seleccionarse en función de la clasificación de la carretera.

**Tabla 16.**

***Vida de diseño recomendado según clasificación del pavimento***

Clasificación de la vía	Vida de diseño (años)
Rutas locales y calles	15-20
Calles principales y vías de mediano tráfico $<15 \cdot 10^6$ EE	20
Carreteras interurbanas y vías de alto tráfico $>15 \cdot 10^6$ EE	20-40

**Nota:** Fuente: TCPavements, 2013.

### 2.9.1.3 Largo de la losa.

El largo de una losa, que es el equivalente al espaciamiento existente entre una junta transversal y la siguiente, depende de la ubicación de construcción del pavimento y las técnicas equipos y materiales utilizados durante la construcción. Si la pavimentación se realiza en un área propensa a alabeos de magnitudes altas, es conveniente realizar juntas transversales menos espaciadas. El largo de la losa debe ser de entre 1,4 y 2,3 m y en caso de tener tráfico en más de una dirección (intersecciones o pavimentos industriales), se debe reducir a no más de 1,75m para evitar que más de un set de ruedas cargue la losa de forma diagonal.(Covarrubias, 2012)

### 2.9.1.4 Espesor de la losa.

Espesor de la losa de concreto, que será la carpeta de rodadura, se expresa en milímetros y el espesor puede ir de 60mm a 250mm. Este programa de diseño permite evaluar el desempeño de un cierto espesor del pavimento o realizar una iteración que obtiene el espesor mínimo que cumple con el umbral de diseño especificado.(Covarrubias, 2012).

### 2.9.1.5 Tipo de borde.

El tipo de borde se refiere a la condición de borde del pavimento, lo cual tiene dos efectos, primero define el soporte lateral que entrega la berma al pavimento en términos de transferencia de carga y por otro lado aleja el tráfico del borde. (Covarrubias, 2012).

Se definieron cuatro tipos de borde que se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 17.*****Tipos de borde y su efecto en términos de soporte y circulación del tráfico.***

Tipo de borde	Soporte a la estructura	¿aleja el tráfico del borde?
Borde libre	Nulo	No
Berma granular / asfáltica	Muy leve	No
Berma de hormigón	Leve	No
Vereda	Mediano	Si

**Nota:** Fuente: TCPavements, 2013.

**2.9.1.6 Losa exterior con sobreebancho.**

El sobreebancho en la losa exterior del pavimento mejora notablemente el desempeño de este al alejar de manera significativa el tráfico del borde ya que aumenta la distancia entre la línea de demarcación externa con el borde del pavimento. (Covarrubias, 2012).

**2.9.1.7 Barras de transferencia de carga.**

El uso de barras de transferencia de carga en juntas transversales permite una mayor y más prolongada transferencia de carga en la junta transversal, mejorando el comportamiento tanto estructural como el escalonamiento. Su uso se recomienda para tráfico alto mayor a 15.000.000 EE. (Covarrubias, 2012).

**2.9.1.8 IRI inicial.**

Es el IRI medido en el pavimento, justo antes de realizar la apertura al tráfico.

**2.9.1.9 Porcentaje de losas agrietadas.**

Es el umbral de daño aceptado, dado un nivel de confiabilidad que se espera tenga el pavimento al final de su vida de diseño. El nivel de daño máximo admisible depende de la importancia de la vía. (Covarrubias, 2012).

**Tabla 18.*****Valores recomendados de porcentaje máximo admisible de losas agrietadas según la clasificación de la vía***

Clasificación De la Vía	Porcentaje de Losas Agrietadas
Calles secundarias y pasajes	30 - 50%
Calles principales y vías de mediano tráfico < 15 <sup>6</sup> ESALS	10 - 30%
Caminos Nacionales y Alto tránsito > 15 <sup>6</sup> EE	10%

**Nota:** Fuente: TCPavements, 2013.

**2.9.1.10 IRI Final de Diseño.**

IRI máximo admisible que deberá cumplir el pavimento. En caso de superar ese valor el pavimento deberá ser sometido a algún tratamiento que permita bajar los niveles de IRI. En general el valor máximo permitido es de 3,5 m/km para Chile.

### **2.9.1.11 Escalonamiento Promedio Final de Diseño.**

Escalonamiento máximo admisible que deberá cumplir el pavimento. En caso de superar ese valor el pavimento deberá ser sometido a algún tratamiento que permita bajar los niveles de escalonamiento. En general el valor promedio máximo permitido es de 5 mm para Chile.

### **2.9.1.12 Confiabilidad.**

Grado de confiabilidad del diseño, que se controla por el factor de confiabilidad (M) que es función de un valor asociado al nivel de confianza de la distribución normal ( $Z_r$ ) y de la desviación normal del error combinado (Se) de todos los parámetros que intervienen en el comportamiento del pavimento.

La desviación normal del error combinado (Se), es la dispersión de resultados entre el daño por fatiga calculado y el daño medido real, esto incluye las dispersiones inherentes a todos los factores que influyen en el comportamiento del pavimento, entre los cuales tienen una participación preponderante los errores que pudieran darse en la predicción del tránsito solicitante y el grado de variabilidad que presentan los suelos de la subrasante. Cuando el nivel de solicitaciones es muy elevado, la probabilidad de errar por defecto en la predicción es menor, debido a que la pista de diseño se encuentra a niveles cercanos a la saturación; asimismo, entre mayor es la dispersión de los valores representativos de los suelos de la subrasante, existe una probabilidad más alta de fallas. Por último, con el propósito de minimizar los trabajos de mantenimiento durante la vida de servicio de la obra, el nivel de confianza del diseño debe crecer en la medida que aumenta el tránsito.

Este método permite asignar de forma diferente niveles de confiabilidad según el tipo de deterioro y se divide en:

- *Confiabilidad Porcentaje de Losas Agrietadas*
- *Confiabilidad IRI Final de Diseño*
- *Confiabilidad Escalonamiento Final Promedio*

**Tabla 19.**  
**Confiabilidad según la clasificación de la vía.**

Clasificación Funcional	Urbano	Rural
Carreteras interurbanas y vías de alto tráfico	85%-97%	80%-95%
Arterias Principales y vías de mediano tráfico	80%-95%	75%-90%
Colectoras – Calles de bajo tráfico	75%-85%	70%-80%
Local – Pasaje	50%-75%	50%-75%

**Nota:** Fuente: TCPavements, 2013.



## 2.9.2 Parámetro de Diseño de Tráfico.

El programa permite ingresar el tráfico como parámetro de diseño, a través de dos variables:

- *Tráfico por Ejes Equivalentes*
- *Tráfico por Espectro de Carga*

### 2.9.2.1 Tráfico por Ejes Equivalentes.

Es un parámetro que transforma los diferentes ejes que circulan por una ruta, a un eje simple de rueda doble (E.S.R.D) de 80 KN (18 Kips) de peso, considerado como eje patrón (Daño Equivalente).

### 2.9.2.2 Clasificación del Tipo de Tráfico.

Tipo de tráfico que que transitará por el pavimento según la Clasificación de Tráfico de la Federal Highway Administration.

La Federal Highway Administration clasifica el tráfico en función del tipo de vehículos que transitan por el pavimento y que van en numeración desde 1 hasta 17. El criterio de selección del grupo a utilizar se muestra en las siguientes dos tablas:

**Tabla 20.**

#### ***Grupo de Clasificación de Tráfico Recomendado según uso del pavimento***

Uso del Pavimento	Grupo de Clasificación Recomendado
Arterias Principales (Rutas Inter-regionales)	1,2,3,4,5,8,11,13
Arterias Principales (Rutas Interregionales incluyendo autopistas urbanas)	1,2,3,4,6,7,8,9,10,11,12,14,16
Arterias Menores	4,6,8,9,10,11,12,15,16,17
Colectoras Mayores	6,9,12,14,15,17
Colectoras Menores	9,12,14,17
Calles Locales y de Servicio	9,12,14,18

**Nota:** Fuente: Federal Highway Administration, 2014.

**Tabla 21.**

#### ***Grupo de clasificación de Tráfico Recomendado según uso del pavimento según tipo de vehículos.***

Porcentaje de Flujo de Buses	Porcentaje de Camiones con múltiples remolques	Porcentaje de Camiones con remolques simples y de una unidad	Grupo TTC
Nulo a Bajo (<2%)	Relativamente Alto Numero de camiones con multiples	Predominio de Remolque Simple Alto porcentaje de camiones de remolque simple, pero con algunos camiones de una unidad	5 8

	remolques (>10%)	Tráfico de camiones mixto, con alto número de camiones con remolque simple;	11
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	13
		Predominio de camiones de una unidad	16
	Numero Moderado de camiones con múltiples remolques (2 a 10%)	Predominio de remolque simple>	3
		Tráfico de camiones mixto, con alto porcentaje de camiones con remolque simple	7
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual porcentaje de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	10
		Predominio de camiones de una unidad	15
	Bajo a Nulo (<2%)	Predominio de remolque simple	1
		Predominio de remolque simple con bajo número de camiones de una unidad	2
		Predominio de remolque simple con bajo a moderado número de camiones de una unidad	4
Bajo a Moderado (entre 2 y 25%)		Tráfico de camiones mixto, con mayor número de camiones con remolque simple	6
		Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	9
		Tráfico de camiones mixto, con mayor número de camiones de una unidad	12
		Predominio de camiones de una unidad	14
Ruta con alto tráfico de buses (>25%)	Bajo a Nulo (<2%)	Tráfico de camiones mixto, con más o menos igual número de camiones de unidad simple y camiones de remolque simple	17

**Nota:** Fuente: Federal Highway Administration, 2014.

### 2.9.2.3 Tasa de crecimiento Anual de Trafico.

Crecimiento anual promedio del tráfico, calculado en base al crecimiento que experimentará el pavimento durante su vida. Como tasa de crecimiento se utiliza en general 5%, sin embargo varía entre 0%(sin crecimiento) hasta 10%.

#### 2.9.2.4 Distribución Lateral del Tránsito.

La influencia de la posición respecto al borde del pavimento es importante, por lo que es importante simular un pavimento con diferentes posiciones del vehículo respecto al borde del pavimento. La posición en la que pasa un vehículo determinado tiene una distribución normal con una media de 45 cm desde la línea de señalización del pavimento y una desviación típica de 25 cm.

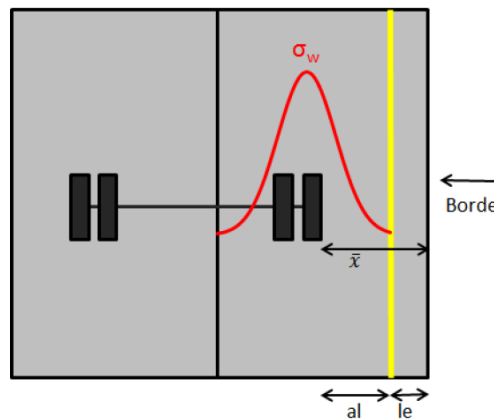


Figura 7. Distribución Lateral Típica de un Pavimento de Concreto

#### 2.9.2.5 Efecto de Soleras y Sobrecancho en la distribución lateral del tráfico.

Con losas o umbrales de borde excesivamente anchos, la distancia que los vehículos cruzan el bordillo aumenta significativamente en comparación con otros tipos de borde. Un umbral aumenta la distancia entre la línea del bordillo y la rueda exterior del vehículo ( $a+l_c$ ) y también reduce la desviación típica de la distribución del tráfico.

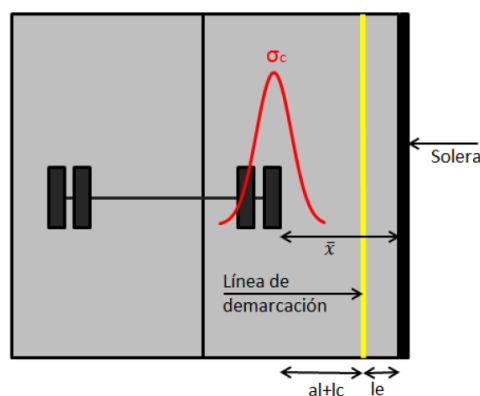
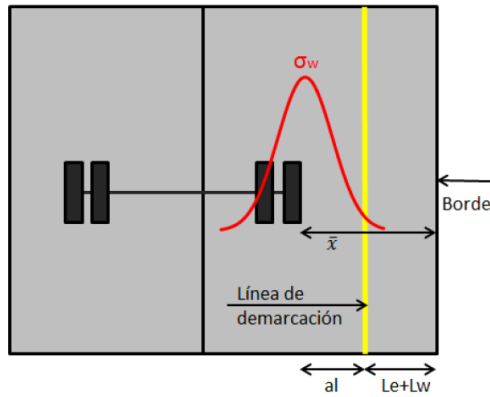


Figura 8. Distribución Lateral para un pavimento con solera en el borde

El efecto del sobrecancho en una losa es similar al de la solera, al aumentar la distancia media del borde. Esto ocurre debido a un aumento en la distancia entre el borde del pavimento y la línea de demarcación ( $L_e+L_w$ )



**Figura 9. Distribución Lateral del tráfico para un pavimento con sobrecorrimiento**

Los valores por defecto de la distancia entre el borde, la línea de demarcación y la rueda externa del vehículo se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 22.**

**Valores por defecto de las distancias entre el borde, la línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos**

Tipo de Borde	Distancia entre el borde y la línea de demarcación	Distancia entre la línea de demarcación y la rueda externa de los vehículos	Distancia entre el borde y la rueda externa de demarcación
Borde libre, Berma de Concreto, berma granular/asfáltica	150 mm	450 mm	600 mm
Solera de borde	150 mm	550 mm	700 mm
Losa con sobrecorrimiento	300 mm	450 mm	750 mm

**Nota:** Fuente: Nota: Fuente: TCPavements, 2013.

Los valores por defecto de la desviación estándar se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 23.**

**Desviación Estándar según tipo de Borde**

Tipo de borde	Desviación Estándar por defecto de distancia Lateral de tráfico
Borde Libre, Berma de Concreto, berma granular / asfáltica	250 mm
Solera de borde	200 mm
Losa con Sobrecorrimiento	250 mm

**Nota:** Fuente: Nota: Fuente: TCPavements, 2013.

### 2.9.3 Parámetros de Diseño de Concreto.

#### 2.9.3.1 Resistencia del concreto.

La resistencia del hormigón se mide por lo general a partir del ensayo de flexo tracción. Sin embargo éste método permite obtener la resistencia a la flexo tracción por medio de la resistencia de probetas cúbicas o cilíndricas utilizando factores de correlación. Se deberá

especificar la resistencia característica e incorporar el efecto de la dispersión de resistencias normales en la fabricación del hormigón.(Covarrubias, 2007)

### **2.9.3.2 Confiabilidad y desviación estándar de la mezcla de concreto.**

Se tiene un nivel de confianza del 80%. Adicionalmente para la desviación estándar se recomienda 0.40 Mpa.

### **2.9.3.3 Aumento de Resistencia 28 – 90 días.**

Debido a la naturaleza del concreto, en un periodo de 28 a 90 días se estima un incremento de resistencia a la flexotracción, se toma por defecto un 10%, esto está condicionado al tipo de mezcla.

### **2.9.3.4 Módulo de elasticidad del concreto.**

El Módulo de Elasticidad del hormigón utilizado se puede obtener ya sea a través de ensayo en laboratorio o por medio de correlaciones con la resistencia a compresión. En caso de no tener certeza de este valor, se recomienda utilizar la siguiente fórmula que correlaciona resistencia a la compresión con módulo de elasticidad.

$$E_c = 57600 * \sqrt{f'c}$$

Dónde:

$E_c$ : Modulo de Elasticidad [Psi]

$f'c$ : Resistencia a la Compresión Cilíndrica [Psi]

### **2.9.3.5 Peso específico del concreto.**

Es el peso de la mezcla de hormigón por unidad de volumen. Se recomienda un valor de 2.400 Kg/m<sup>3</sup>.(Covarrubias, 2007).

### **2.9.3.6 Módulo de Poisson.**

Es la razón entre la deformación unitaria lateral y la deformación unitaria axial, causada por una carga en el sentido axial. Su valor por defecto es de 0,15 y varía entre 0,1 y 0,25.(Covarrubias, 2007).

### **2.9.3.7 Coeficiente de expansión térmico.**

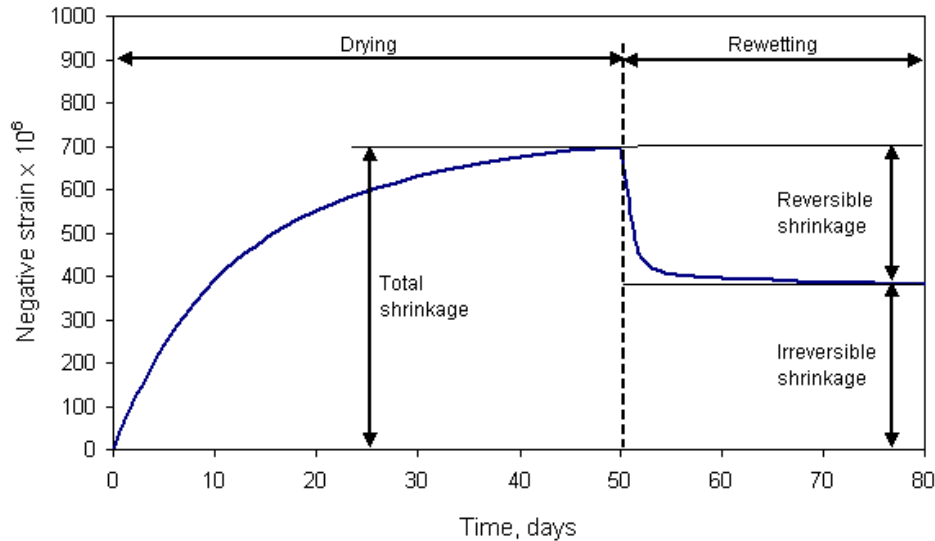
Es una medida de la expansión o contracción de un material al ser sometido a cambios de temperatura. Para el concreto se utiliza un valor de  $1 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$  salvo que se determine el valor por ensayo de laboratorio.

### **2.9.3.8 Retracción del concreto a 365 días.**

La retracción del concreto es un parámetro de gran importancia en el concreto que afecta la transferencia de carga que habrá entre dos juntas. Como se ve en la siguiente imagen, esta retracción va aumentando a medida que el hormigón se va endureciendo, hasta un punto en el que baja bruscamente y luego se estabiliza. La retracción en este

punto es irreversible ya que no disminuye si se sigue saturando la mezcla. (Covarrubias, 2012).

Por defecto la Retracción a 365 días se determina aumentando en un 30% este valor final. Se utiliza por defecto 0,0007 (700 $\mu\epsilon$ ).



**Figura 10. Retracción típica del concreto en el tiempo**

#### **2.9.3.9 Contenido de aire.**

Porcentaje de aire contenido en la mezcla de concreto.

#### **2.9.3.10 Relación Agua/Cemento.**

Cantidad de agua utilizada por unidad de cemento en la mezcla de concreto.

### **2.9.4 Parámetros del suelo.**

#### **2.9.4.1 Número de capas.**

Sin considerar la subrasante como capa, se debe ingresar el número de tipos de suelo, hasta un máximo de seis.

#### **2.9.4.2 Métodos de ensayo de suelos.**

Existen tres métodos de ensayos de suelos posibles. Estos son:

- *LAB: Mediciones hechas en laboratorio mediante ensayo triaxial*
- *CBR: Mediciones obtenidas mediante correlación con el ensayo CBR (Se recomienda utilizar la siguiente fórmula)*

$$Mr = 179.61 * (CBR)^{0.64} \quad \text{kg / cm}^2$$

- *FWD: Mediciones realizadas con deflectómetro de impacto*

#### **2.9.4.3 Modulo Resiliente y Poisson de la Capa.**

Se tiene que ingresar el módulo resiliente y Poisson de cada capa.

#### **2.9.4.4 Espesor de capa.**

Espesor de cada capa ingresada.

#### **2.9.4.5 Resistencia a la erosión.**

La Resistencia a la erosión que tenga la capa que soporta el pavimento, tiene un impacto significativo en la aparición de deterioros en el pavimento, especialmente con el escalonamiento. La resistencia a la erosión se subclasifica en cinco niveles:

- Nivel 1- Materiales extremadamente resistentes a la erosión
- Nivel 2- Materiales muy resistentes a la erosión
- Nivel 3- Materiales resistentes a la erosión
- Nivel 4- Materiales poco resistentes a la erosión
- Nivel 5- Materiales muy erosionables

#### **2.9.4.6 Coeficiente de Fricción Pavimento – Base.**

Coeficiente de Fricción presente entre la losa de hormigón y la capa soportante, lo que afecta la transferencia de carga del pavimento. Para el caso de suelos granulares, se recomienda usar 0,65 mientras que para una base tratada con cemento: 0.8. (Covarrubias, 2007)

#### **2.9.4.7 Porcentaje de material fino en la subrasante.**

Porcentaje de material que pasa la malla#200 existente en la subrasante.

#### **2.9.4.8 Procesamiento de los parámetros del soporte del suelo.**

El programa utiliza el método K-Sem para obtener los módulos k de la subrasante, para el invierno y el verano.

#### **2.9.4.9 Valores Recomendados Suelos.**

A continuación se muestra una tabla, con valores mínimo máximo, promedio de módulo resiliente y promedio de módulo de Poisson recomendados según el tipo de suelo.

**Tabla 24.**

#### **Valores mínimos recomendados según tipo de suelo**

Tipo de Suelo	Módulo Resiliente Mínimo (MPa)	Módulo Resiliente Máximo (MPa)	Módulo Resiliente Promedio (MPa)	Módulo de Poisson
A-1	270	295	280	0,35
A-1-b	250	280	265	0,35
A-2-4	200	265	225	0,35
A-2-5	170	230	200	0,35
A-2-6	150	220	185	0,35
A-2-7	150	200	170	0,35
A-3	170	250	205	0,35
A-4	150	205	170	0,35
A-5	120	180	140	0,40
A-6	95	170	120	0,40
A-7-5	55	125	85	0,40
A-7-6	35	95	55	0,40

CH	35	95	55	0,40
MH	55	125	85	0,40
CL	95	170	120	0,40
ML	120	180	140	0,40
SW	200	265	225	0,40
SP	170	230	200	0,40
SW-SC	150	220	180	0,40
SW-SM	170	230	200	0,40
SP-SC	150	220	180	0,40
SP-SM	170	230	200	0,40
SC	150	200	170	0,40
SM	200	265	225	0,35
GW	280	295	290	0,35
GP	250	280	265	0,35
GW-GC	200	280	240	0,35
GW-GM	250	285	270	0,35
GP-GC	200	275	240	0,35
GP-GM	220	280	250	0,35
GC	170	265	220	0,35
GM	230	295	270	0,35
Pavimento de Hormigón	10.000	29.000	32.000	0,35
Pavimento de Hormigón BTC	500	1.800	1.000	0,35
BTA	3.000	6.000	5.000	0,35
	300	800	500	0,35

Nota: Fuente: TCPavements, 2013.

### 2.9.5 Clima.

El clima se ingresa a través de bases de datos de las diferentes localidades del país las cuáles entregan ciertas distribuciones de diferenciales de. En caso de que ningún clima sea aplicable a la zona en que se construirá el pavimento y no se tenga información, se deberán utilizar los 4 climas genéricos.(Covarrubias, 2012)

- *Húmedo- Heladizo*
- *Húmedo-no Heladizo*
- *Seco- Heladizo*
- *Seco-No Heladizo*

#### 2.9.5.1 Gradiente de construcción.

Este gradiente se expresa como el gradiente térmico (°C) que existiría para tener la losa plana. El valor depende gran parte de la época del año cuando se construye, y del clima de la zona. Debido a que no existe mucha información con respecto a este valor por lo que se recomienda utilizar los siguientes valores según la zona en que se construirá el pavimento.(Covarrubias, 2012).

- *Zonas Húmedas sin viento -5°C.*
- *Zonas Húmedas con viento y zonas secas sin viento -10°C*
- *Zonas Secas con viento y Altura -15° C*



- *Condiciones extrema de evaporación de agua -20°C*

#### **2.9.5.2 Temperaturas invierno, verano.**

*Corresponde a la temperatura media en las distintas épocas del año, desde la menor en invierno hasta la mayor en verano.*

*Se contempla también la temperatura que alcanza el concreto durante las 24 horas en su etapa de fraguado.*

#### **2.9.5.3 Número de días al año con precipitaciones.**

Registro anual con la cantidad de días con presencia de precipitaciones pluviales.

#### **2.9.5.4 Índice de congelamiento de la base.**

Porcentaje del tiempo en el año que la base se encuentra a una temperatura inferior a 0°C.

#### **2.9.6 Resultados que se obtiene.**

Se entrega lo siguiente:

- a) Si se utilizó la opción iterar espesor óptimo:
  - El espesor mínimo de concreto que cumple con las condiciones del proyecto.
  - El porcentaje de agrietamiento que tendrá el pavimento v/s tiempo y al final de su vida de diseño (Longitudinal, Transversal o Esquina)
  - Un resumen con los parámetros de diseño más relevantes
- b) Si se evaluó un cierto espesor:
  - El porcentaje de agrietamiento que tendrá el pavimento v/s tiempo y al final de su vida de diseño, por cada tipo (Longitudinal, Transversal o Esquina)
  - Un resumen con los parámetros de diseño más relevantes.

## Capítulo III. Metodología

### 3.1 Descripción Del Lugar De Ejecución

UBICACIÓN : Salida Arequipa KM 6 , Acceso Principal de la UPeU  
PROVINCIA : San Román  
DEPARTAMENTO: Puno  
PAIS : Perú

#### Factores De Diseño

El diseño de pavimentos rígidos implica el análisis de diversos factores: tráfico, drenaje, clima, características del suelo, capacidad de transferencia de cargas, nivel de servicio deseado y grado de fiabilidad con el que debe realizarse el diseño en función de la importancia de la carretera. Todos estos factores son necesarios para predecir el comportamiento fiable del pavimento y evitar que éste alcance un nivel de falla durante su vida útil.

### 3.2 Población Y Muestra

#### 3.2.1 Población.

Así, una población es el conjunto de todos los casos que concuerdan con una serie de especificaciones (Sampieri, 2010).

Está constituido por todos los caminos vecinales de la ciudad de Juliaca, de manera directa por la Zona Oeste – Salida Arequipa.

#### 3.2.2 Muestra.

En las muestras no probabilísticas, la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con las características de la investigación o de quien hace la muestra. Aquí el procedimiento no es mecánico ni con base en fórmulas de probabilidad, sino que depende del proceso de toma de decisiones de un investigador.

Debido a que el acceso principal al campus de la universidad, es una vía transitada y cuenta con un IMDA de 620 vehículos / día, que da un ESAL de 1,170,089; adicionalmente se tiene el nivel freático a  $H=1.50\text{cm}$ ; por lo que se cumple los requisitos mínimo establecidos por Covarrubias(2012) en su artículo “Diseño de losas de hormigón con geometría optimizada”.

Además se realizó la comparación con un pavimento AASHTO  $e=20\text{cm}$  que está construido alrededor de la zona muestreada.

### **3.2.3 Muestreo.**

Es de tipo no probabilístico, de muestra intencional, porque dentro de todas las vías no pavimentadas del Campus de la universidad, seleccionaremos el acceso principal, por tener un mayor volumen de tránsito.

### **3.3 Tipo De Investigación**

El tipo de investigación de la presente Tesis es APLICADA. Por qué se está tomando referencias de otras investigaciones similares y se somete a estímulos externos controlados por el investigador. (SAMPIERI, 2010).

### **3.4 Nivel De Investigación**

El Nivel de Investigación es **DESCRIPTIVO COMPARATIVO APLICADO** porque va a la descripción de conceptos o fenómenos o del establecimiento de relaciones entre conceptos; está dirigido a responder a las causas de los eventos físicos o sociales. Como su nombre lo indica, su interés se centra en comparar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se da este frente a otros. (SAMPIERI, 2010)

### **3.5 Hipótesis**

#### **General**

La aplicación del tipo de pavimento TCP, presentará un mejor comportamiento técnico y económico frente a los pavimentos tradicionales para su empleo en el acceso principal de la UPeU.

#### **Específicos**

1. Se podrá determinar las dimensiones y espesor de una losa corta bajo la metodología TCP de acuerdo a las solicitudes requeridas para el acceso de la UPeU.
2. Las características y propiedades de los materiales a usar en los pavimentos cumplirán las normas técnicas establecidas, tanto en las nacionales como en las internacionales.
3. El costo de la metodología TCP será menor en comparación a la metodología AASHTO.

### **3.6 Variables**

La variable con la cual se va a trabajar en esta investigación es el espesor del pavimento de concreto, que dependerá de las dimensiones de la losa bajo la metodología TCP.

#### **3.6.1 Variables Independientes.**

- Diseño Estructural del Pavimento

### 3.6.2 Variables Dependientes.

- Factores que intervienen en el diseño de Pavimentos de concreto, como son el estudio de suelos, diseño de mezcla; y proceso constructivo.
- Diseño de la estructura de pavimento tipo TCP.
- Costo de la construcción de Pavimentos de concreto tradicionales y TCP.

### 3.7 Tipo De Diseño

Se asume una investigación experimental, a su vez la investigación a realizar será de categoría cuasiexperimental.(Valderrama, 2002).

Son cuasiexperimentales porque los sujetos no se asignan al azar a los grupos ni se emparejan, sino que dichos grupos y están conformados antes del experimento: son grupos intactos (Hernández et al., 2014)

**Tabla 25.**

#### ***Diseño de la investigación***

Grupo	Variable independiente	Postprueba
E	X	O1
C	-	O2

**Nota:** Fuente Valderrama (2002)

Donde:

E: Grupo experimental -- Acceso de la Universidad Peruana Unión

C: Grupo de control

O: Observaciones al grupo de control y experimental

X: Parámetros mínimos para el empleo del pavimento tipo TCP ubicada en el acceso de la UPeU.

### 3.8 Materiales

#### 3.8.1 Sub Base granular.

En este estudio se realizó la combinación de canteras en los siguientes porcentajes: Isla 55% y Vallecito en 45%, esta proporción cumple con los parámetros indicados por la EG 2013.

Se realizó los siguientes ensayos: análisis granulométrico (ASTM D 422/MTC 107), límite líquido (MTC E 110), límite plástico (MTC E 111), abrasión los Ángeles (MTC E 207), Contenido de Humedad (MTC E 108) y equivalente de arena (MTC E 114). Para obtener sus propiedades físicas y poder evaluarlo según el parámetro que establece la normativa.

### **3.8.2 Agua.**

El agua utilizada para los ensayos y el diseño de mezcla fue del campus de la Universidad Peruana Unión, la cual es potable y debido a ello no se realizó pruebas de calidad.

### **3.8.3 Concreto $f'c=350\text{kg/cm}^2$ .**

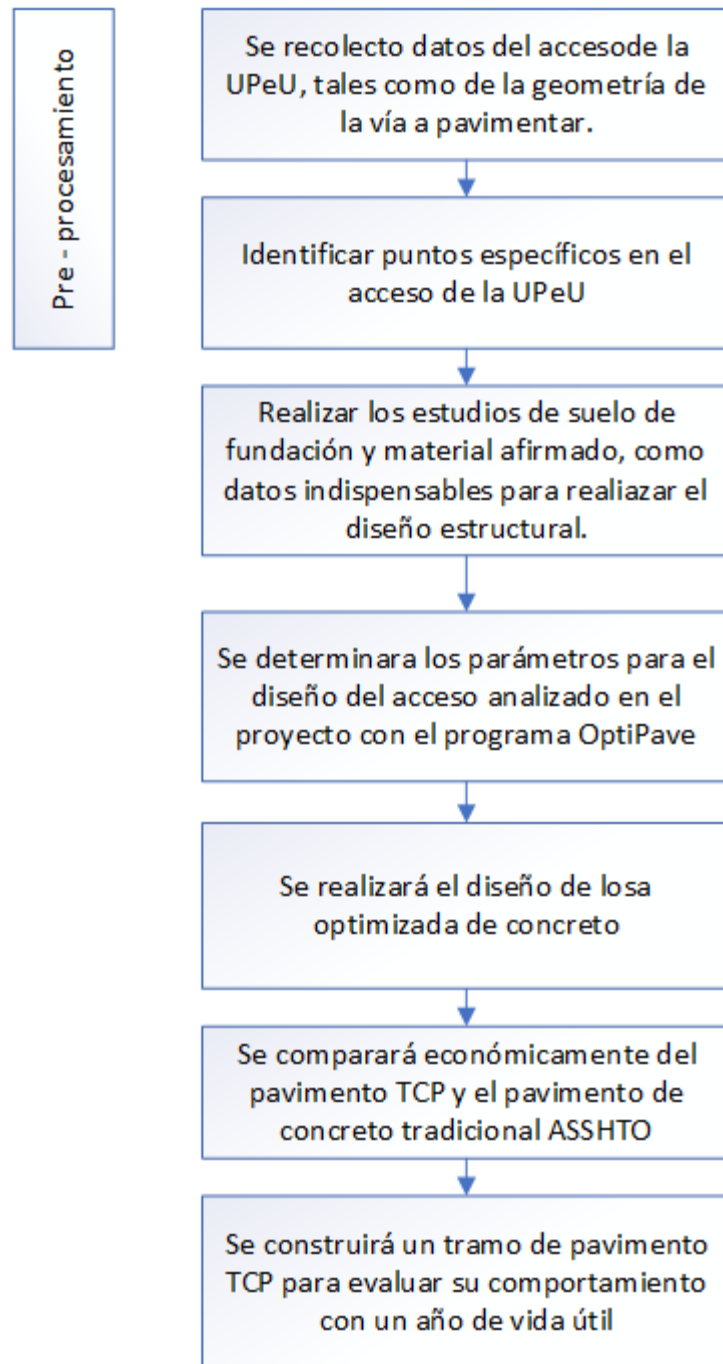
Se uso el concreto premezclado con un  $f'c=350\text{kg/cm}^2$ , IP relación con Agua/cemento 0.25 – 0.35 , piedra chancada de TMN  $\frac{3}{4}$ " (HUSO 67) y un Slump de 4" a 6". Fue suministrado por la empresa SUPERMIX.SA.

## **3.9 Metodología**

### **3.9.1 Método De Estudio.**

Para lograr demostrar que la alternativa de aplicación de la nueva tecnología de pavimento TCP a ser empleada en el acceso de la Universidad Peruana Unión, responde a las expectativas técnicas y económicas en comparación con los pavimentos convencionales; en primer lugar, se realizaron ensayos y se recopilaron datos sobre el hormigón utilizado en el pavimento; a continuación, se realizará una comparación económica entre los pavimentos convencionales y los pavimentos propuestos en este documento.

Paralelamente se realizó la descripción de las consideraciones en campo a tener en cuenta durante su construcción.



**Figura 1 Pasos por seguir del método de estudio.**

### **3.9.2 Técnicas e Instrumentos De Recolección De Datos.**

En este proyecto de investigación se realizaron pruebas de campo y se recogió el suelo natural y el material de subrasante utilizado para el pavimento de la carretera de acceso a la UPeU. El diseño del pavimento tipo TCP se validó con el software OptiPave V 2.0 y se comparó con un pavimento rígido convencional diseñado según el método AASHTO.

### **3.9.3 Procedimiento de investigación.**

#### **3.9.3.1 Recolección De Datos.**

Se obtuvo la información mediante una selección para la revisión de información de proyectos similares y de libros que involucren temas relacionados con la investigación con el fin de obtener datos confiables y absolutamente necesarios, en este aspecto cabe la oportunidad de tomar como referencia las aplicaciones que se hicieron con esta metodología en las investigaciones hechas y las conclusiones que llegaron.

#### **3.9.3.2 Observación.**

Se realizó la recolección de datos de manera visual en campo, específicamente en el conteo vehicular, así mismo en los ensayos de mecánica de suelos para la obtención de los parámetros de diseño de pavimentos.

#### **3.9.3.3 Análisis De Datos.**

Se procedió al análisis de los datos de campo, tratando de que estos sean los certeros, depurando los datos que de alguna manera podrían ser irreales.

### **3.9.4 Técnicas De Procedimiento De Datos, Interpretación Y Análisis De Resultados.**

Las técnicas de procesamiento de datos se mencionan a continuación.

#### **3.9.4.1 Tráfico.**

En esta etapa se realizó el estudio concerniente al tráfico, tomando calles que presentan mayor índice de tráfico en el ámbito de estudio.

En el desarrollo del Estudio de Tráfico, se contemplan tres etapas claramente definidas:

- Recopilación de la información;
- Tabulación de la información; y
- Análisis de la información y obtención de resultados.

#### **3.9.4.2 Estudio de suelos.**

La recolección de datos se realizará mediante ensayos al material que conformara la base granular, dichos ensayos mostraran las características físicas que el material debe de cumplir, los ensayos respectivos que deberían cumplir el material granular se encuentran registrados en el Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales Sección 403.

**Tabla 26.**

***Normativa para la validación de ensayos***

<b>MUESTRA</b>	<b>ENSAYO</b>	<b>NORMA</b>
General	Granulometría	AASHTO D 422

Agregado Grueso	Abrasión los ángeles	MTC E 207
Agregado fino	Índice plástico Equivalente de arena	MTC E 111 MTC E 114

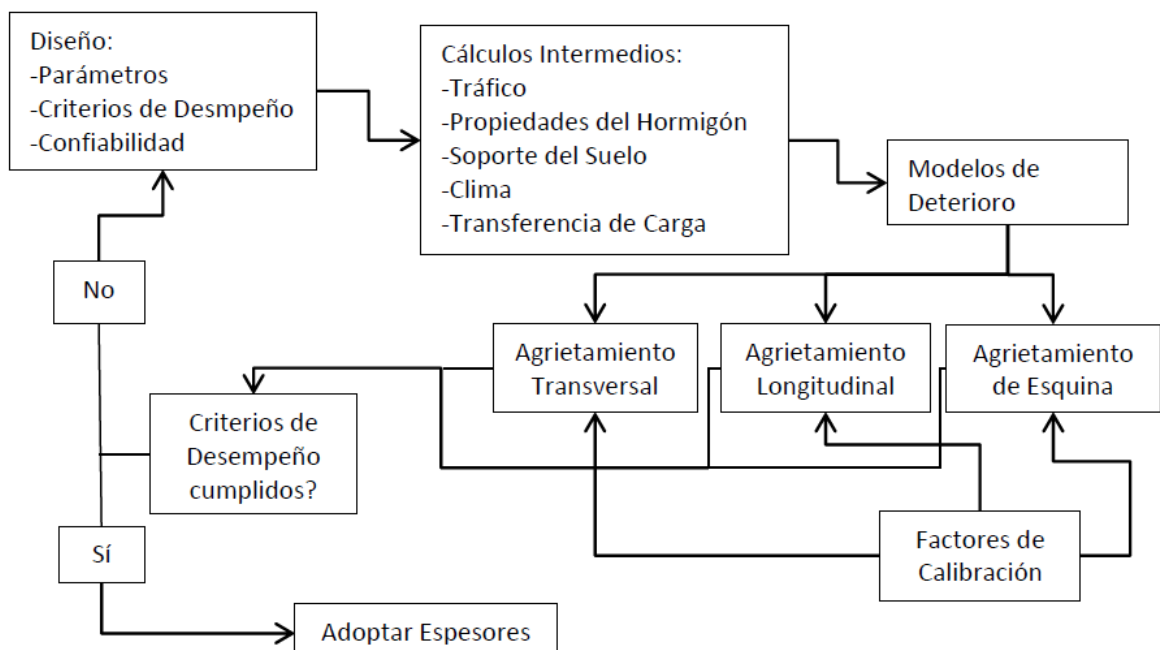
**Nota:** Fuente: Elaboración propia

### 3.9.4.3 Obtención de parámetros para el diseño.

La metodología propuesta requiere el uso combinado de diferentes herramientas: Método AASHTO para diseño de Pavimentos Rígidos, especificaciones del TCP Pavements (patente original), el empleo del programa OptiPave v 2.0, bibliografía sobre tipos de pavimentos (tecnología del pavimento).

**Tabla 27.**

**Diagrama de flujo del Método de Diseño Utilizado por Optipave**



**Nota:** Fuente: Covarrubias (2007)

### 3.9.5 Campo de estudio.

Cari (2018) menciona que la mezcla de las canteras Isla y Vallecito cumple con los parámetros requeridos para ser usados como material de préstamo en una subbase, motivo por el que se eligió las canteras mencionadas, recalando también que esta elección no fue de manera aleatoria porque esta alternativa de solución tiene como propósito reducir costos de transporte de material al lugar de aplicación.



### Cantera Isla

Ubicación: Se ubica al Nor-este de la ciudad de Juliaca, con un recorrido de 30 a 35 minutos, con un acceso de 7.50 km de trocha carrozable Juliaca-Puente Isla, sobre el río Cabanillas.

Accesibilidad: Es accesible por la trocha carrozable Juliaca-Puente Isla.

### Cantera vallecito

Ubicación: a 0.60 km de distancia de la zona de estudio.

Accesibilidad: Es accesible por la vía asfaltada Juliaca-Arequipa.

## 3.10 Análisis de datos

### 3.10.1 Hipótesis.

Tabla 28

**Planteamiento de hipótesis: Espesor**

DESCRIPCION	PLANTEAMIENTO	INTERPRETACION DEL PLANTEAMIENTO
Hipótesis Nula	Ho: $T1 \geq T2$	El comportamiento técnico de la metodología TCP, <b>NO PRESENTA</b> diferencias entre el promedio del espesor y dimensiones frente a un pavimento rígido convencional.
Hipótesis de investigación	Hi: $T1 < T2$	El comportamiento técnico de la metodología TCP, <b>PRESENTA</b> diferencias entre el promedio del espesor y dimensiones frente a un pavimento rígido convencional.

**Nota:** Fuente: Elaboración propia; T1 = Pavimento con diseño TCP; T2=Pavimento con diseño convencional.

Tabla 29

**Planteamiento de hipótesis: costo del pavimento**

DESCRIPCION	PLANTEAMIENTO	INTERPRETACION DEL PLANTEAMIENTO
Hipótesis Nula	Ho: $T1 \geq T2$	El costo de la metodología TCP, <b>NO PRESENTA</b> diferencias entre el promedio de costo frente a un pavimento rígido convencional.
Hipótesis de investigación	Hi: $T1 < T2$	El costo de la metodología TCP, <b>PRESENTA</b> diferencias entre el promedio de costo frente a un pavimento rígido convencional.

**Nota:** Fuente elaboración propia; T1=Pavimento TCP; T2=Pavimento con diseño convencional.

### **3.10.2 Nivel de significancia.**

Se utilizó un margen de error de  $\alpha = 0.05$  es decir que las pruebas de hipótesis se realizó con un nivel de confianza del 95%.

### **3.10.3 Regla de decisión.**

La regla de decisión asumida para la prueba de hipótesis es la siguiente: Si el valor de la probabilidad de que  $H_0$  sea verdadera ( $p$ ) es menor que el margen de error ( $\alpha$ ), se rechaza la hipótesis nula, de lo contrario, se asume que la hipótesis nula  $H_0$  es la verdadera.

## Capítulo IV: Resultados y discusión

### 4.1 Presentación de Resultados

#### 4.1.1 Caracterización del material de la subrasante.

Este proceso tiene como objetivo la evaluación de las características físicas y mecánicas del material presente de la subrasante, extraído de la calicata C – 01, el cual según el manual de suelos y pavimentos este tiene que cumplir con los parámetros de una subrasante.

##### 4.1.1.1 Calicata – 01.

##### a. Análisis granulométrico

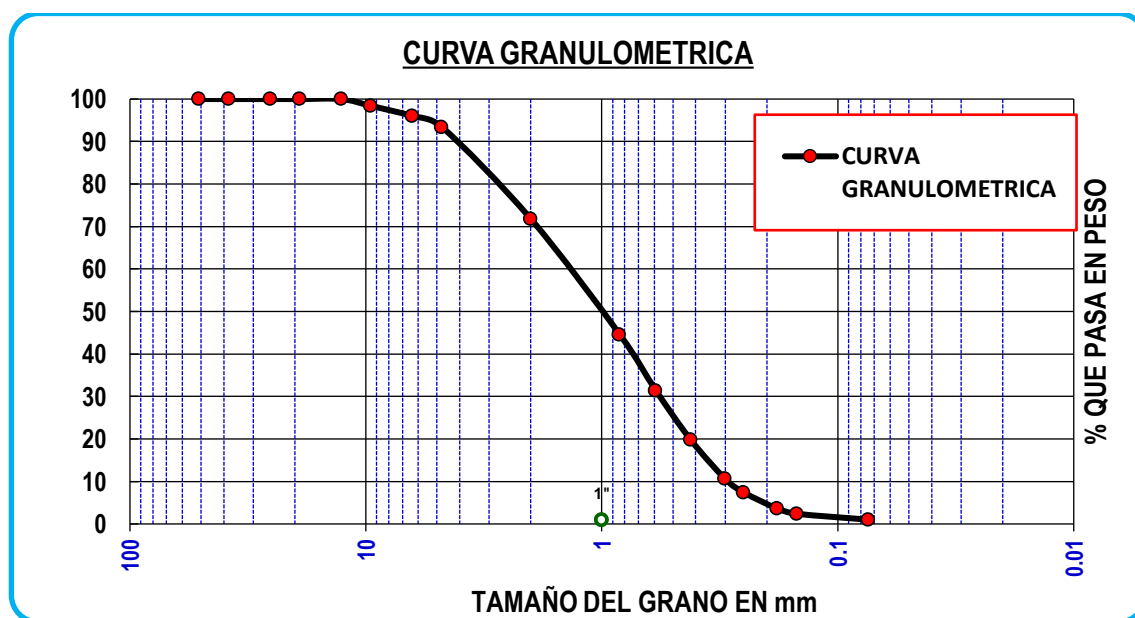


Figura 11. Gráfico de resultados granulométricos - Subrasante - Calicata 01

Tabla 30.

#### Características granulométricas – Subrasante – Calicata 01

CARACT. GRANULOMETRICAS		
Coefficiente de Uniformidad	de	4.73
Coefficiente de Curvatura	de	0.81

Nota: Fuente: Elaboración propia

##### b. Índice de plasticidad

Tabla 31.

#### Resultados del ensayo de límites de consistencia – Subrasante – Calicata 01

LIMITES DE CONSISTENCIA		
Límite Líquido	:	NP
Límite Plástico	:	NP
Índice de Plasticidad	de	NP

Nota: Fuente: Elaboración propia

**c. Clasificación de la cantera**

El material de cantera presenta en 1.00% la pasante del tamiz N° 200, 71.80% la pasante del tamiz N°10, 93.40% la pasante del tamiz N° 4, también muestra un coeficiente de curvatura de 0.81, un coeficiente de uniformidad de 4.73 y no presenta plasticidad. Por lo tanto este suelo puede ser considerado como un SP según el SUCS y como un A-3 según el AASHTO (Ver Anexo A-1).

**d. Características mecánicas**

**Tabla 32.**

**Características mecánicas de la subrasante – Calicata 01**

ENSAYO	NORMA	PARAMETRO >= 3000 m.s.n.m.	RESULTADOS
CBR	MTC E 132	6% Min.	6.56%

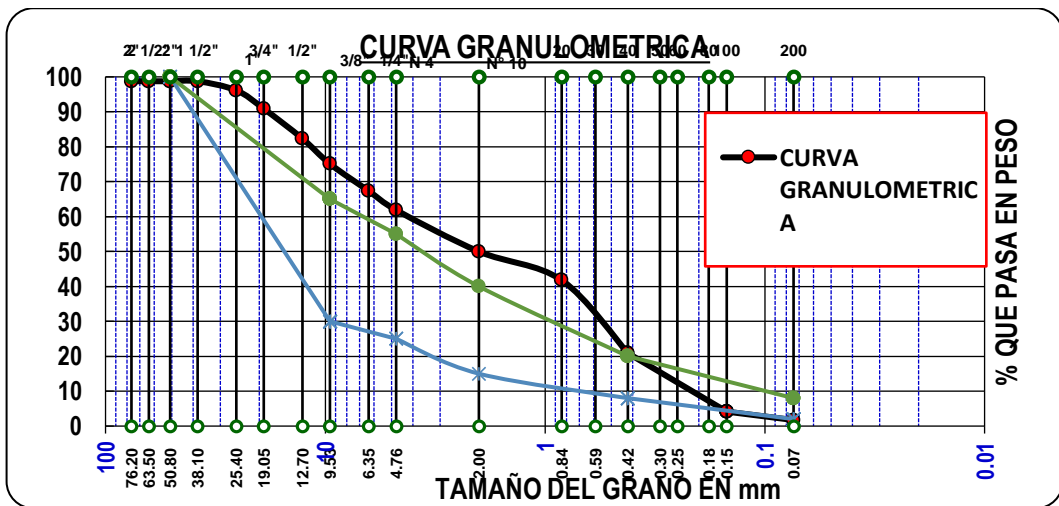
**Nota:** Fuente: Elaboración propia

**4.1.2 Caracterización del material de la subbase granular.**

Este proceso tiene como objetivo la evaluación de las características físicas y mecánicas de los materiales a emplear en la subbase granular, el cual según el manual de suelos y pavimentos este tiene que cumplir con los parámetros de una subbase granular. Así mismo para nuestra investigación se estudió las canteras Isla y Vallecito realizando ensayos de caracterización, para luego realizar su combinación correspondiente.

**4.1.1.1. Cantera Isla.**

**a. Análisis granulométrico**



**Figura 12. Gráfico de resultados granulométricos-Cantera Isla**

**Tabla 33.**  
**Características granulométricas - Cantera Isla**

CARACT. GRANULOMETRICAS		
Coefficiente de Uniformidad	de	12.11
Coefficiente de Curvatura	de	0.30

Nota: Fuente: Elaboración propia

**b. Índice de plasticidad**

**Tabla 34.**  
**Resultados del ensayo de límites de consistencia-Cantera Isla**

LIMITES DE CONSISTENCIA		
Límite Líquido	:	NP
Límite Plástico	:	NP
Índice de Plasticidad	:	NP

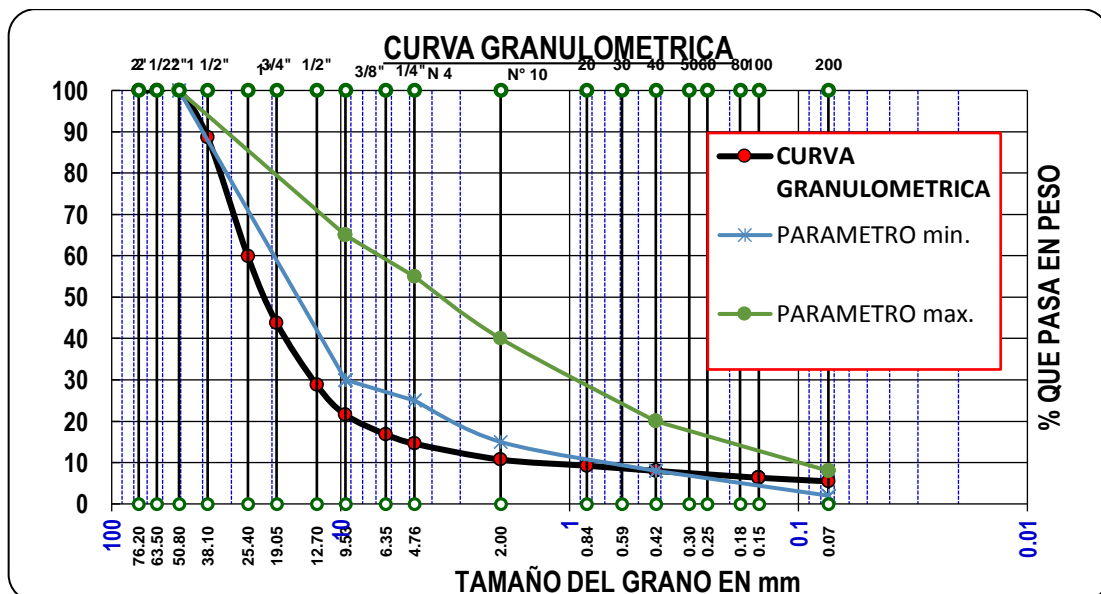
Nota: Fuente: Elaboración propia

**c. Clasificación de la cantera**

El material de cantera presenta en 1.74% la pasante del tamiz N° 200, 49.99% la pasante del tamiz N°10, 61.86% la pasante del tamiz N° 4, también muestra un coeficiente de curvatura de 0.34, un coeficiente de uniformidad de 17.75 y no presenta plasticidad. Por lo tanto este suelo puede ser considerado como un SP según el SUCS y como un A-3 según el AASHTO.

**4.1.1.2. Cantera Vallecito.**

**a. Análisis granulométrico**



**Figura 13. Gráfico de resultados granulométricos-Cantera Vallecito**

**Tabla 35.**  
**Características granulométricas-Cantera Vallecito**

<b>CARACT. GRANULOMETRICAS</b>		
Coeficiente de uniformidad	de	19.32
Coeficiente de curvatura		5.15

**Nota:** Fuente: Elaboración propia

**b. Índice de plasticidad**

**Tabla 36.**  
**Resultados del ensayo de límites de consistencia – Cantera Vallecito**

<b>LIMITES DE CONSISTENCIA</b>		
Limite Liquido	:	26.57%
Limite Plástico	:	18.29%
Índice de Plasticidad	:	8.29%

**Nota:** Fuente: Elaboración propia

**c. Clasificación de la cantera**

El material de cantera presenta en 5.45% la pasante del tamiz N° 200, 10.71% la pasante del tamiz N°10, 14.56% la pasante del tamiz N° 4, también muestra un coeficiente de curvatura de 5.15, un coeficiente de uniformidad de 19.32 y presenta un índice de plasticidad de 8.29%. Por lo tanto este suelo puede ser considerado como un GP o GC según el SUCS y como un A-2-4 según el AASHTO.

**4.1.1.3. Combinación de canteras.**

Para cumplir las especificaciones técnicas para un material de subbase granular, se decide combinar las canteras Isla y Vallecito, para lograr de tal forma una granulometría que este dentro de los parámetros de la normativa.

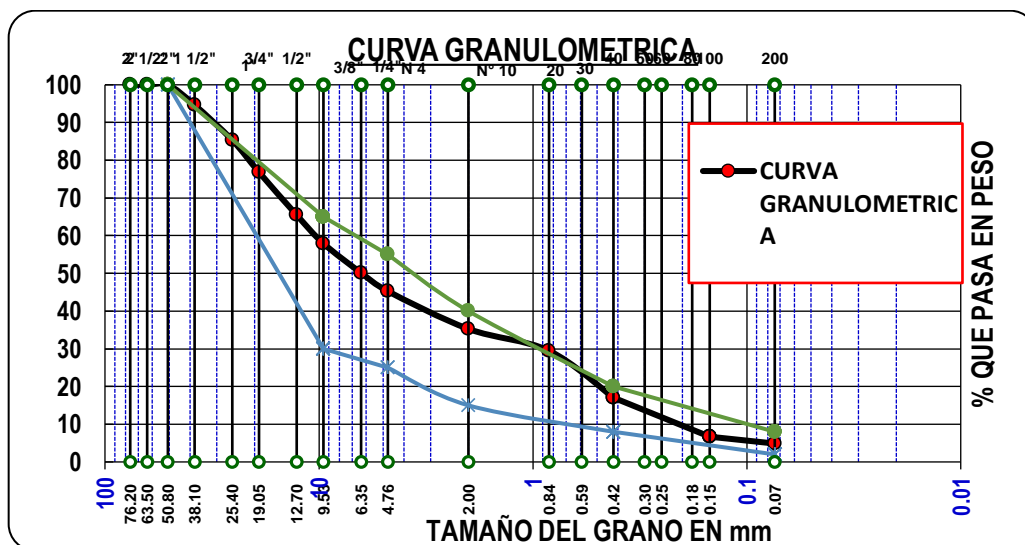
**a. Combinación teórica:**

La combinación teórica de canteras se realizó por el método de dosificación de agregados por peso, debido a que no existe parámetro técnico normativo que defina un método en específico para la combinación de agregados de canteras, debido a que con este método proporcionamos tentativamente los porcentajes de combinación de los materiales de canteras, tomándose en consideración primordial el criterio del ingeniero responsable.

**Tabla 37.**  
**Combinación de canteras Isla y Vallecito**

Tamiz N°	SUELO-CANTERA VALLECITO			AGREGADO-CANTERA ISLA			PESO RETENIDO
	PESO RETENIDO	% QUE PASA	45%	PESO RETENIDO	% QUE PASA	55%	
2	50.80	100.00	45.00	100.00	55.00	100.00	100.00
1 1/2"	38.10	89.63	40.33	87.66	98.75	54.31	94.64
1"	25.4	113	72.07	32.43	182.14	96.15	85.31
3/4"	19.05	367	59.64	26.84	369.00	90.87	76.82
1/2"	12.7	782	44.87	20.19	599.41	82.31	65.46
3/8"	9.53	449	36.97	16.64	505.73	75.09	57.93
1/4"	6.35	779	29.10	13.10	542.00	67.34	50.13
No4	4.76	454	24.99	11.24	384.00	61.86	45.27
No10	2.00	1176	17.29	7.78	831.00	49.99	35.27
No20	0.84	547	14.46	6.51	574.00	41.79	29.49
No40	0.42	431	12.35	5.56	1463.00	20.89	17.04
No100	0.15	562	9.82	4.42	1172.00	4.14	6.70
No200	0.07	219	8.73	3.93	168.53	1.74	4.88

**Nota:** Fuente: Elaboración propia

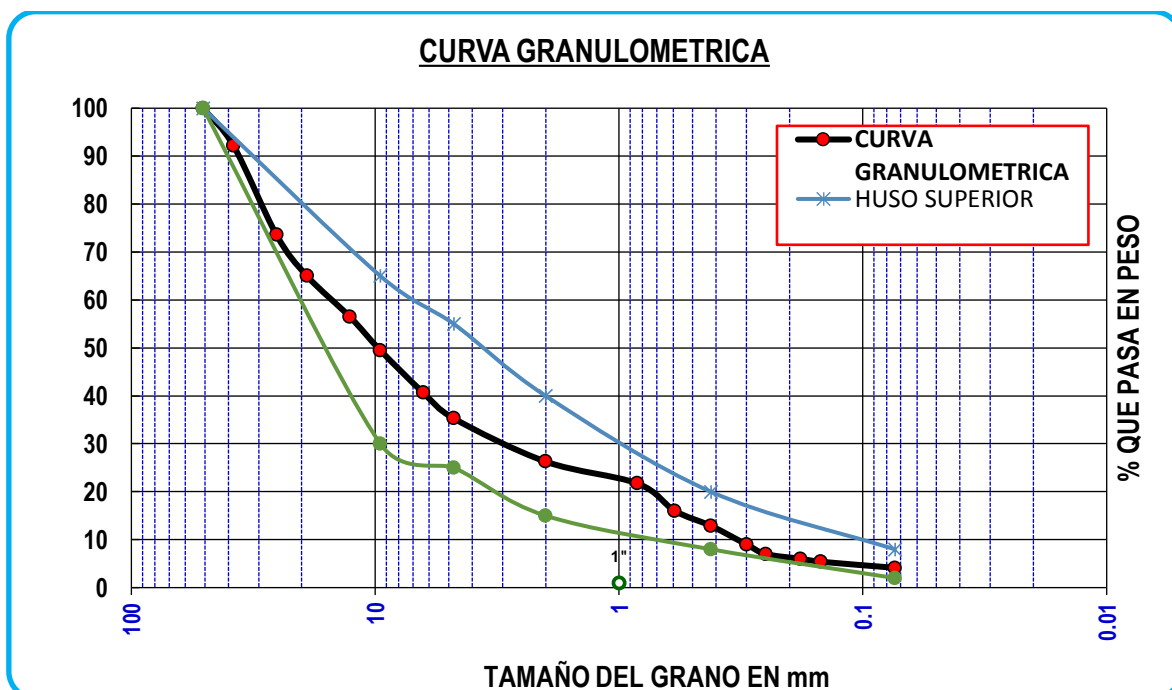


**Figura 14.** Gráfico de resultados granulométricos-Combinación teórica – Cantera Isla - Vallecito

La grafica granulométrica muestra que la combinación, en la proporción de: Isla 55% y Vallecito 45%, está dentro de los parámetros establecidos, pero a su vez no cumple con algunos porcentajes de granos de suelo, específicamente en el tamiz N°40.

Para establecer que esta proporción es la adecuada se debe realizar nuevamente el análisis granulométrico para luego proceder a realizar los ensayos faltantes.

**b. Análisis granulométrico:**



**Figura 15. Grafica de resultados granulométricos -Combinación de canteras Isla y Vallecito**

**Tabla 38..**

**Características granulométricas-canteras combinadas**

CARACT. GRANULOMETRICAS	
Coefficiente de uniformidad	53.33
Coefficiente de curvatura	1.94

**Nota:** Fuente: Elaboración propia

**c. Características físico-mecánicas:**

**Tabla 39.**

**Características físicos - mecánicas**

ENSAYO	NORMA	PARAMETRO	RESULTADOS
Índice de Plasticidad	MTC E 111	>= 3000 m.s.n.m. 2% Max.	NP
Abrasión los Ángeles	MTC E 207	40% Max.	25.66 %
CBR	MTC E 132	100% Min.	72.74 %

**Nota:** Fuente: Elaboración propia

La combinación realizada presenta una mejora en las características físicas y mecánicas de la muestra final, cumpliendo los parámetros establecidos por el Manual de



Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales y logrando alcanzar un valor de soporte aceptable para caminos menores a 10'000,000 EE.

**d. Clasificación de la cantera:**

El material de cantera presenta en 4.13% la pasante del tamiz N° 200, 26.29 % la pasante del tamiz N°10, 35.29% la pasante del tamiz N° 4, 12.89% la pasante del tamiz N°40, también muestra un coeficiente de curvatura de 1.94, un coeficiente de uniformidad de 53.33 y no presenta plasticidad. Por lo tanto este suelo puede ser considerado como un GW según el SUCS y como un A-1-a según el AASHTO.

**4.2 Diseño de pavimento alternativo metodología TCP**

Los datos de diseño corresponden a las variables necesarias para el diseño de una estructura de pavimento, tomándose en consideración un CBR de diseño para subrasante de 6% y según la Administración Federal de Carreteras (FHWA siglas en ingles) es una ruta intermedia de camiones livianos y camiones de remolque simple (Tipo II).

De acuerdo con el lugar de estudio se eligió un periodo de diseño de 20 años considerándose como una vía urbana de un tránsito elevado.

**4.2.1 Periodo de diseño.**

- *Periodo de diseño: 20 años*
- *Trafico: 1170 089 EE*

**4.2.2 Distribución de ejes (Recomendado por TCP).**

- *ESRS: 20%*
- *ESRD: 40%*
- *EDRD: 30%*
- *ETRD: 10%*

**4.2.3 Tránsito (Recomendado por Tcp).**

- *BORDE: 8%*
- *HUELLA: 30%*
- *CORTE: 8%*

**4.2.4 Carga.**

- *EE: 100%*
- *EE CON SOBRECARGA: 0%*

**4.2.5 IRI.**

- *IRI inicial: 1.8 (recomendado por TCPavements.)*
- *IRI final: 4.5 (serviciabilidad final)*

#### **4.2.6 Capacidad de soporte del suelo de fundación.**

- *Módulo de resiliencia de la subrasante de 58 mpa.*
- *Clasificación SUCS: SP Arena mal graduada, poco o nada de finos.*

#### **4.2.7 Base granular.**

- *CBR de 80.77 %, obtenido al 95% de M.D.S. a una penetración de 0.1", equivalente a 20.6 kg/cm<sup>3</sup>*
- *Clasificación SUCS: GW*

#### **4.2.8 Propiedades del concreto.**

- *MR = 48 kg/cm<sup>2</sup>.*
- *Sin fibra metálica.*
- *Módulo de elasticidad (E) = 26714.56*
- *Módulo de Poisson= 0.15*
- *Coefficiente de dilatación térmica = 0.00001*
- *Retracción a 365 días (m/m) = 0.001*

#### **4.2.9 Confiabilidad.**

- *Confiabilidad: 80 %*

#### **4.2.10 Escalonamiento promedio máximo permitido (mm).**

- *Escalonamiento final: 5.0*

#### **4.2.11 Porcentaje máximo de losas agrietadas admisible.**

- *Porcentaje de losas agrietadas: 10%*

#### **4.2.12 Clima.**

- *Húmedo –Heladizo*
- *Gradiente de construcción: -10%*
- *Temperatura media invierno (°C) : 6.5*
- *Temperatura media verano (°C) : 11.5*

#### **4.2.13 Sello de juntas.**

- *Sello de Juntas: NO REQUIERE*

#### **4.2.14 Barras de amarre.**

- *Barras de amarre: NO REQUIERE*

#### **4.2.15 Confinamiento lateral.**

- *Confinamiento lateral: BERMAS DE CONCRETO, VEREDA.*

### 4.3 Espesor determinado por el programa e = 131 mm

El Software después de la iteración muestra como resultado un pavimento de con los siguientes espesores:

- 13 cm de pavimento rígido
- 15 cm de subbase granular

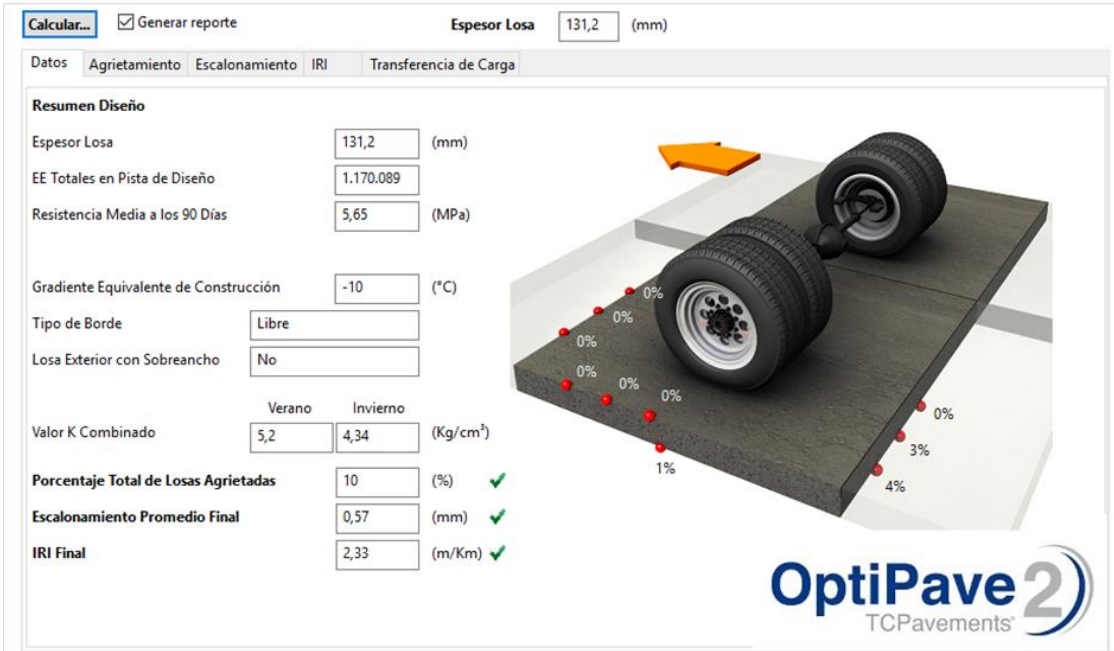


Figura 16. Espesor calculado por software OptiPave 2

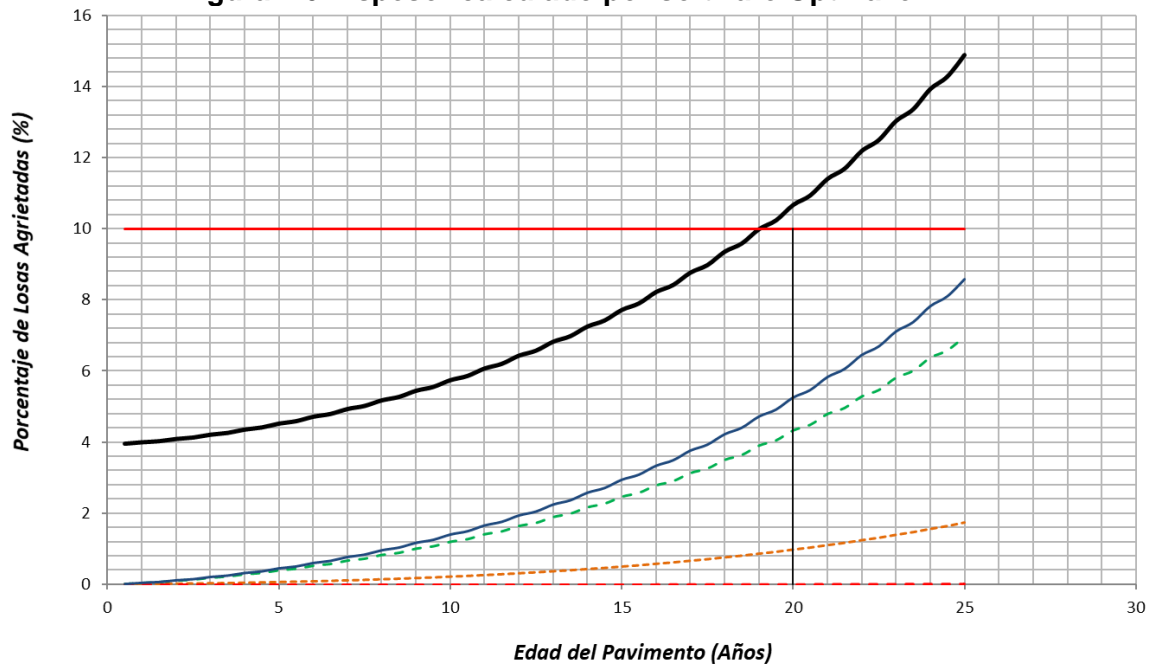
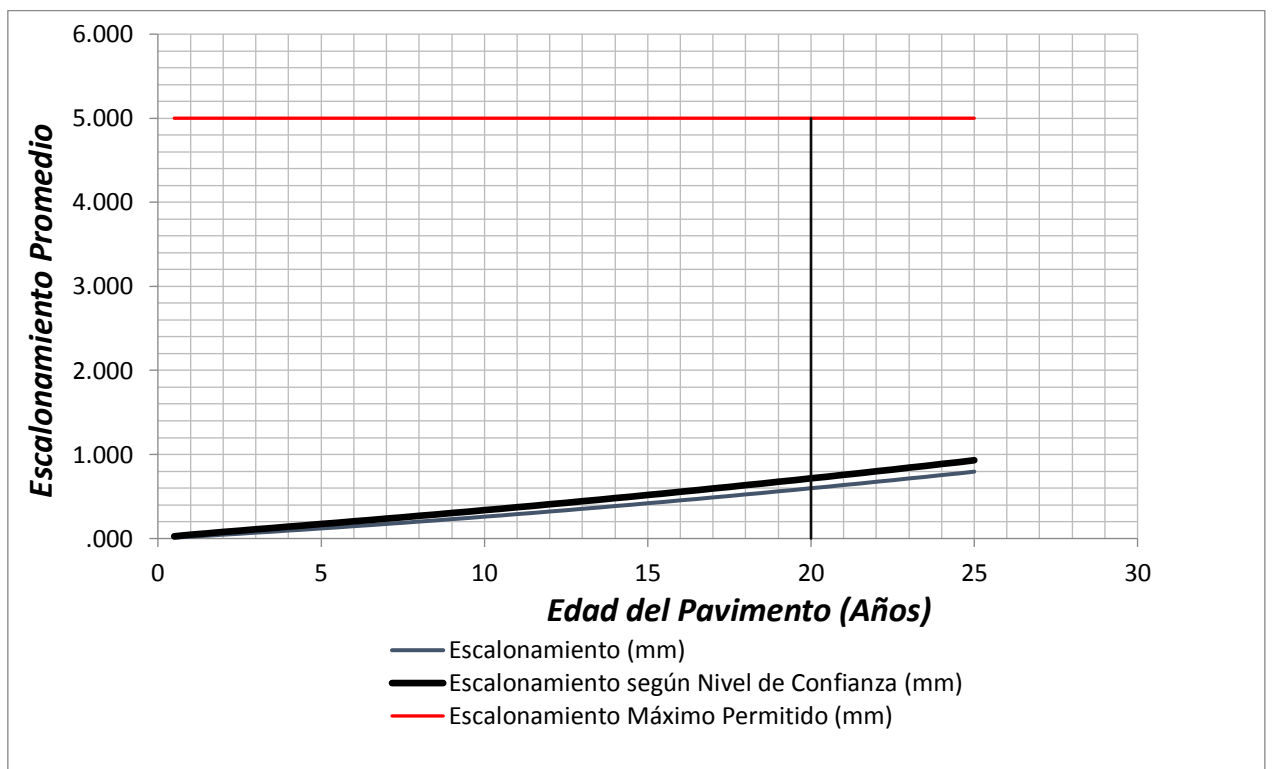


Figura 17. Porcentaje de losas agrietadas (%)

Donde:

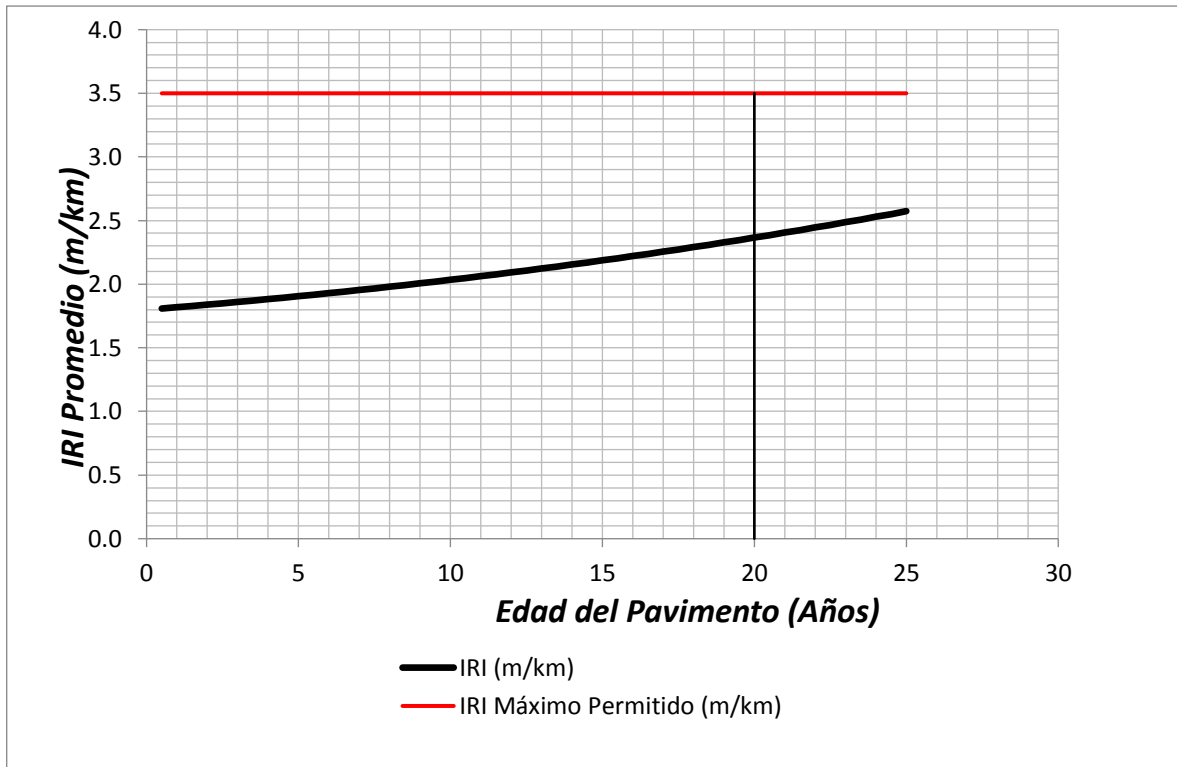
- % Losas con Grietas Transversales
- % Losas con Grietas Longitudinales
- % Losas con Grietas de Esquina
- % Losas Totales con Grietas
- % Losas Totales con Grietas según N.de Conf.
- % Losas con Grietas Máx. Permitido

En la figura anterior se presentan los porcentajes de agrietamiento conformen se cumple la edad del pavimento de diseño, se verifica que el agrietamiento total (azul), agrietamiento transversal (naranja) y agrietamiento longitudinales (verde), no sobrepasen el porcentaje de losas agrietadas de diseño (%losas totales con grietas según N. de configuración).



**Figura 18. Escalonamiento promedio**

El escalonamiento entre juntas final (azul), cuyo valor es de 0.05 cm, menor al escalonamiento máximo permitido asumido 5 cm, esto es debido a que las dimensiones de las losas de con un largo de 1.20m no presentarán diferencias de elevaciones producidas por las juntas o grietas.



**Figura 19. IRI promedio**

El índice de rugosidad Internacional, se encuentra menor al límite en los 20 años de diseño del pavimento.

#### **4.4 Proceso constructivo del pavimento optimizado**

##### **4.4.1 Consideraciones preliminares.**

###### **4.4.1.1 Subrasante.**

Se procede al trabajo de nivelación de superficie con márgenes de error +/- 10mm promedio, para su posterior compactación o apisonado.

###### **4.4.1.2 Subbase.**

Se realizó el batido la mezcla de material de relleno de las canteras ya estudiadas, Cantera Isla y Vallecito, con las proporciones establecidas, para ello se utilizó un retroexcavadora.



**Figura 20. Batido de material granular para subbase**

El material se colocó y esparció en una capa uniforme y sin segregación de tamaño hasta tal espesor suelto, para que la capa tenga después de ser compactada el espesor requerido. Se efectuó el extendido con equipo mecánico apropiado. El espesor de la capa subbase será de 0.15 m. y será extendido a través de todo el ancho y largo de la vía.



**Figura 21. Extendido del material de subbase en todo el ancho de la vía**

Inmediatamente después del extendido del material, este fue compactado en su ancho por medio de rodillo vibratorio, para este caso debido al tamaño del pavimento se optó por un rodillo vibratorio marca DYNAMIC R300H 5500 VPM de 20 KN (2000 kg) con un motor de 6.5 HP de operación manual, dicho rodillo compacto de forma gradual desde los costados hacia el centro, en sentido paralelo al eje del camino y continuo así hasta que toda la superficie haya recibido este tratamiento. En todos los sitios no accesibles, al rodillo,

el material de base fue compactado integralmente mediante el empleo de apisonadores mecánicos.



**Figura 22.** Compactación de subbase con rodillo vibratorio, y apisonador mecánico

Durante el progreso de la compactación se efectuaron ensayos de densidad de acuerdo con el método AASHTO-T-180, mismo que comprueba que la densidad tiene que llegar al 100% de la densidad máxima determinada en el laboratorio mediante el ensayo de PROCTOR MODIFICADO.



**Figura 23.** Ensayo de densidad de campo mediante cono de arena

#### **4.4.1.3 Encofrado.**

Los encofrados son de tablas de 13 cm de altura (requerido para este proyecto) en ancho de 2cm. De acuerdo con el tipo de encofrado tipo cajón, se colocaron fijados con madera cuadrada tornillo de 2" x 2", los durmientes fueron de maderas tornillo de 3" x 2" fijadas al suelo con estacas de acero de 3/4". Debido a que el vaciado de concreto fue en el mismo día, y todos los paños en su totalidad, fue dividido en el eje con una forma de acero de 13cm de altura y 1/2" de espesor.

La colocación de los moldajes de encofrado se realiza con una cuadrilla de 5 carpinteros quienes usaran estacas metálicas para afirmar el encofrado a la base, aproximadamente 3 estacas por moldaje de 2.44m., la parte superior del moldaje estará a nivel de piso terminado operación garantizada por equipos de niveles ópticos. La misma cuadrilla desencofrará y harán el mantenimiento necesario para el uso posterior a una nueva faena.



**Figura 24. Encofrado de los paños del pavimento h: 13cm**

#### **4.4.1.4 Concreto.**

Se realizaron reuniones de coordinación con la planta de concreto premezclado para dejar en claro los requerimientos y especificaciones técnicas para esta obra y se creó una responsabilidad de tal manera que ante un incumplimiento de lo pactado se devolviera el mixer de concreto, siempre y cuando los requerimientos de este no se cumplan.

En esta reunión se establece lo siguiente:

- a) La cantidad de cubos según el área a ejecutar.
- b) El método de colocación del concreto, para este caso se hizo de forma directa.
- c) La resistencia a la compresión ( $f'c$ ) de 350kg/cm<sup>2</sup>.
- d) Revenimiento (slump) de 4.5" a 5.5" a pie de obra con una diferencia máxima de Slump entre mixers de 1".



- e) Temperatura del concreto no mayor de 30° C.
- f) Frecuencia de llegada de mixers que en este caso está definida a 20 min.

#### **4.4.2 Tareas previas al vaciado.**

- a) Coordinar la llegada del concreto al horario estipulado, para la presente investigación se quedó iniciar el trabajo a las 10:00:00 am.
- b) Verificar los niveles de la base, con nivel de ingeniero.
- c) Humedecer la base.
- d) Verificar los encofrados nivelados, alineados.
- e) Verificar suministro de aditivos para el curado.
- f) Verificar ubicación de la vibradora de concreto, para facilitar su movilización.
- g) Verificar paso de los mixers.
- h) Check List de máquinas y herramientas.
- i) Verificar Cerramiento lateral y coberturas (de ser necesario)
- j) Verificar que el personal cuente con los implementos necesarios para trabajar adecuadamente.
- k) Verificar la limpieza de la zona de trabajo.

#### **4.4.3 Procedimiento del vaciado.**

##### **4.4.3.1 Verificación del Slump de concreto $MR = 48 \text{ kg/cm}^2$ $F'c=350 \text{ kg/cm}^2$ .**

Este procedimiento consiste en observar el slump (asentamiento del concreto) para confirmar la trabajabilidad de la mezcla del concreto, de llegada a obra del concreto, este proceso se realiza con la ayuda de un Cono de Abrams y el resultado del revenimiento debe ser en un valor (entre 4.5" y 5.5").



**Figura 25. Verificación del Slump**

#### **4.4.3.2 Colocación del concreto $MR = 48 \text{ KG/CM}^2$ $F^{\prime}C=350 \text{ KG/CM}^2$ .**

Esta partida consta de esparcir el concreto de lado a lado sin dejar espacios vacíos, el vaciado debe ser continuo para que el hidratado del concreto también sea continuo, esta partida se realizara en forma manual con ayuda de una cuadrilla de vaciados que consiste en 8 operarios y 2 peones, y con las herramientas necesarias para realizar un trabajo de calidad.



**Figura 26. Colocado del concreto  $MR=48\text{kg/cm}^2$  –  $F^{\prime}c=350\text{kg/cm}^2$**

#### **4.4.3.3 Vibrado del concreto $MR = 48 \text{ KG/CM}^2$ $F^{\prime}C=350 \text{ KG/CM}^2$ .**

Esta partida consta que un solo operario encargado del vibrado debe hacerlo de forma vertical y espaciado cada 30 cm. dependiendo del cabezal y del espesor de la losa debe darle énfasis a los bordes por ser puntos fijos donde la regla vibradora no logra vibrar adecuadamente.



**Figura 27. Vibrado del concreto con equipo manual**

#### **4.4.3.4 Regleado del concreto $MR = 48 \text{ KG/CM}^2$ $F^{\text{C}} = 350 \text{ KG/CM}^2$ .**

La partida se realizó en forma mecánica con máquinas niveladoras, con vibración regulada para mejor compactación de losa de concreto.



**Figura 28. Regleado de paño de concreto con equipo**

#### **4.4.3.5 Retardante de fragua.**

Esta partida se realizó con un aditivo retardante el cual será aplicado en la mezcla de concreto del pavimento, con la finalidad de prolongar su fraguado, de modo que permita darle los acabados superficiales en el modo que lo requiera el pavimento, debido a la naturaleza pedregosa del concreto.

#### **4.4.3.6 Acabado final de losas.**

Esta partida se realizó en forma manual con una plancha metálica, todo esto según sea el caso de terminación del mandante y siguiendo los procedimientos adecuados que exigen

las reglas del buen arte para la ejecución de pavimentos. Después con un escobillón de fibra que le dio la apariencia final a la losa (peinado).

La superficie debe tener la rugosidad suficiente para asegurar la adherencia de las ruedas de los vehículos que circularán por ella.

- *Al revisarla con una regla de al menos 3 m de longitud, no debe presentar, en sectores sin cambio de pendiente, diferencias mayores de 5 mm.*
- *No debe presentar protuberancias mayores de 5 mm.*



**Figura 29. Acabado con plancha metálica**

#### **4.4.3.7 Corte de pavimento.**

El corte primario se realiza tan pronto el concreto permita hacer un corte fino sin despostillar los bordes de la junta de contracción y también a manera de controlar las fisuración en el piso realizando cortes para juntas de contracción esto se realiza, para la presente investigación se empezó con el corte 20 horas después, con una cortadora de pavimento en fresco, con un espesor de 3 mm de la hoja de corte.



**Figura 30. Corte de juntas después de 20 horas.**

#### **4.4.3.8 Curado.**

El curado se realiza en dos partes y tiempos diferentes, en un primer instante se realiza el curado con un curador acrílico colocado en una mochila de aspersión, para así lograr una dosis de aplicación pareja que puede estar entre los 5 m<sup>2</sup>/l de curador aproximadamente para toda el área de la losa. Al aplicarse sobre el concreto o mortero fresco forma una película de baja permeabilidad que evita la pérdida prematura de humedad para garantizar un completo curado del material. Debe cumplir con la norma ASTM C 309, todo esto se realiza por un mínimo de 7 días.

El segundo curado consta en el método por inundación y se cubre después con una capa de plástico, para evitar la pérdida de agua por evaporación o exudación de la losa, y también para evitar que se incrusten que elementos contaminantes con la losa.



**Figura 31. Curado del pavimento**

#### 4.4.3.9 Sellado de juntas.

El pavimento espesor optimizado no requiere el uso de sello de juntas posterior.

#### 4.5 Ensayos realizados al concreto

La resistencia del concreto se incrementa con el tiempo, pero no se puede medir directamente in situ por ninguno de los métodos de pruebas disponibles. Sin embargo, diferentes métodos de laboratorio pueden ser empleados para probar la resistencia del concreto. Ninguna de las pruebas de laboratorio simula de forma exacta el tipo de esfuerzos que se producen en el pavimento, pero dan una idea adecuada de su respuesta que puede ser empleada en el diseño o en el control de calidad durante la ejecución.

##### 4.5.1 Resistencia a la compresión y módulo de ruptura.

Ensayo de compresión es un ensayo técnico para determinar la resistencia de un material o su deformación ante un esfuerzo de compresión. Asimismo, la resistencia a la compresión simple es la característica mecánica principal del concreto, dada la importancia que reviste esta propiedad, dentro de una estructura convencional de concreto reforzado, la forma de expresarla es, en términos de esfuerzo, generalmente en kg/cm<sup>2</sup>.

Se elaboraron (03) testigos cilíndricos extraídos del concreto premezclado antes del vaciado, mismos que fueron sometidos al ensayo de resistencia de concreto, cuyos resultados fueron mayores al F'c= 350 kg/cm<sup>2</sup> de diseño.

Para obtener el módulo de ruptura o resistencia a la flexión, se hace la siguiente correlación emitida por el ACI 318.

$$MR = 2.5 \sqrt{f'c}$$

Tabla 40.

#### **Resistencia a la compresión y correlación para Módulo de ruptura**

TESTIGO	RESISTENCIA			CONDICIÓN
	A	MR (F'c)	MR Mpa	MR > 4.58
	COMPRESIÓN F'c			mpa
Testigo # 01	370	48.088	4.72	Aceptable
Testigo # 02	365	47.7624	4.68	Aceptable
Testigo # 03	375	48.4122	4.77	Aceptable

**Nota:** Fuente: Elaboración propia

#### 4.6 Análisis de costos

El análisis de costo tiene como objetivo determinar el beneficio económico de cada pavimento proyectado, tomando en consideración la inversión inicial del pavimento, para luego elegir la óptima estructura de pavimento que cumplirá las solicitudes de la zona de estudio.

Para el correspondiente costo del pavimento se tomó en consideración 1 m<sup>2</sup> de cada estructura.

##### a) Pavimento rígido e=20cm

**Tabla 41.**

Análisis de costos unitarios de pavimento rígido

Item	Descripción	UND	METRADO	COSTO	TOTAL
<b>01.00.00</b>	<b>Pavimento rígido e=20cm</b>				
<b>01.01.00</b>	<b>Movimiento de tierras</b>				<b>33.80</b>
01.01.01	Trazo, nivelación y replanteo	m2	1.00	1.46	1.46
01.01.02	Corte superficial hasta subrasante C/máquina	m3	0.20	5.36	1.072
01.01.03	Preparación de subrasante	m2	1.00	5.26	5.26
01.01.04	Colocación de subbase E=0.20m	m2	1.00	11.52	11.52
01.01.05	Colocación de base E=0.20m	m2	1.00	11.52	11.52
01.01.06	Eliminación de material excedente C/máquina D<4km	m3	0.24	12.35	2.964
<b>01.02.00</b>	<b>Pavimento rígido</b>				<b>82.21</b>
01.02.01	Suministro de concreto F'c = 280 kg/cm <sup>2</sup>	m3	0.20	308	61.6
01.02.02	Curado de losa	m2	1.00	2.56	2.56
01.02.03	Junta asfáltica de construcción y/o dilatación	m	1.11	4.38	4.8618
01.02.04	Encofrado, vaceado y acabado de pavimento	m2	1.00	13.19	13.19
	<b>Costo directo</b>				<b>116.01</b>

Son: Ciento dieciseis y 00/100 nuevos soles

Nota: Fuente: Elaboración propia.

##### b) Pavimento TCP

**Tabla 42.**

Análisis de costos unitarios de pavimento TCP

Item	Descripción	UND	METRADO	COSTO	TOTAL
<b>01.00.00</b>	<b>Pavimento TCP</b>				
<b>01.01.00</b>	<b>Movimiento de tierras</b>				<b>22.28</b>
01.01.01	Trazo, nivelación y replanteo	m2	1.00	1.46	1.46
01.01.02	Corte superficial hasta subrasante C/máquina	m3	0.20	5.36	1.072
01.01.03	Preparación de subrasante	m2	1.00	5.26	5.26
01.01.04	Colocación de subbase E=0.15m	m2	1.00	11.52	11.52
01.01.05	Eliminación de material excedente C/máquina D<4km	m3	0.24	12.35	2.964
<b>01.02.00</b>	<b>Pavimento rígido</b>				<b>65.61</b>

01.02.01	Suministro de concreto $M_r=48 \text{ kg/cm}^2$ - $f'_c=350\text{kg/cm}^2$	$\text{m}^3$	0.10	450	45.00
01.02.02	Corte de juntas transversales	$\text{m}$	1.00	2.56	2.56
01.02.03	Curado de losa	$\text{m}^2$	1.11	4.38	4.8618
01.02.04	Encofrado, vaceado y acabado de pavimento	$\text{m}^2$	1.00	13.19	13.19
	<b>Costo directo</b>				<b>87.89</b>

Son: ochenta y siete y 89/100 nuevos soles

**Nota:** Fuente: Elaboración propia.

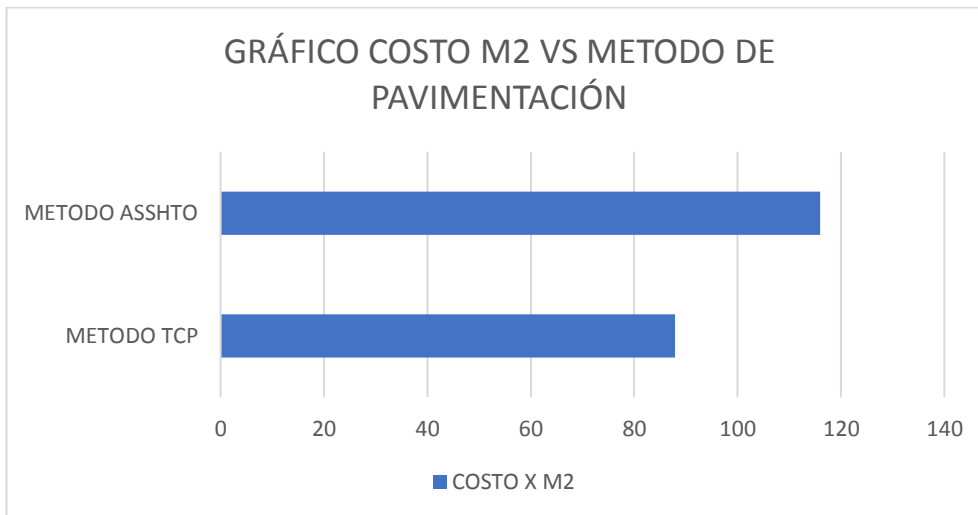
Después de la obtención de Costos por metro cuadrado por cada uno de los métodos analizados, se realiza la comparación y la estimación porcentual en cuanto a la diferencia de precios. Cabe aclarar que para el cálculo del costo se realizó sin la variación de precios en cuanto a los insumos, mano de obra y las maquinarias.

**Tabla 43.**

Comparación de costo de métodos TCP y ASSHTO

N°	MÉTODO DE PAVIMENTACION	ESPESOR DE LOSA	COSTO X M2
1	Método TCP	$E=0.10\text{m}$	87.89
2	Método ASSHTO	$E=0.20\text{m}$	116.01
	DIFERENCIA	$E=0.07\text{m}$	28.12

**Nota:** Fuente: Elaboración propia.



**Figura 32. Gráfico costo m2 vs método de pavimentación**

De acuerdo con los resultados obtenidos del costo de un metro cuadrado de estructura mostrados en las tablas anteriores se observa, que el pavimento diseño bajo la metodología TCP es 21% más económico que uno diseñado bajo metodología AASHTO,



esto debido a la disminución considerable del espesor y al incremento del valor estructural de la subbase.

#### 4.7 Evaluación del pavimento después de un año

Se realizaron ensayos después de un año construido y sometido a la carga diseñada. Se evaluaron el estado físico del pavimento, mediante inspecciones visuales en busca de fisuras o asentamientos del pavimento, se midió la resistencia a la compresión del concreto mediante ensayos no destructivos, y por último se evaluó el Índice de Rugosidad Internacional (IRI) del pavimento. Todo esto para tener una idea adecuada del estado del pavimento y ver si está dentro de los parámetros de diseño bajo la metodología TCP.

##### 4.7.1 Ensayos de resistencia a la compresión con esclerómetro.

Mediante ensayos no destructivos, se evaluó la resistencia del pavimento a la compresión con esclerómetro en una posición de  $+90^\circ$  (vertical), en diferentes puntos del área total del pavimento seleccionadas aleatoriamente sean en el centro de la vía como en las zonas laterales, se muestra un croquis del pavimento con el número de ensayo realizado.

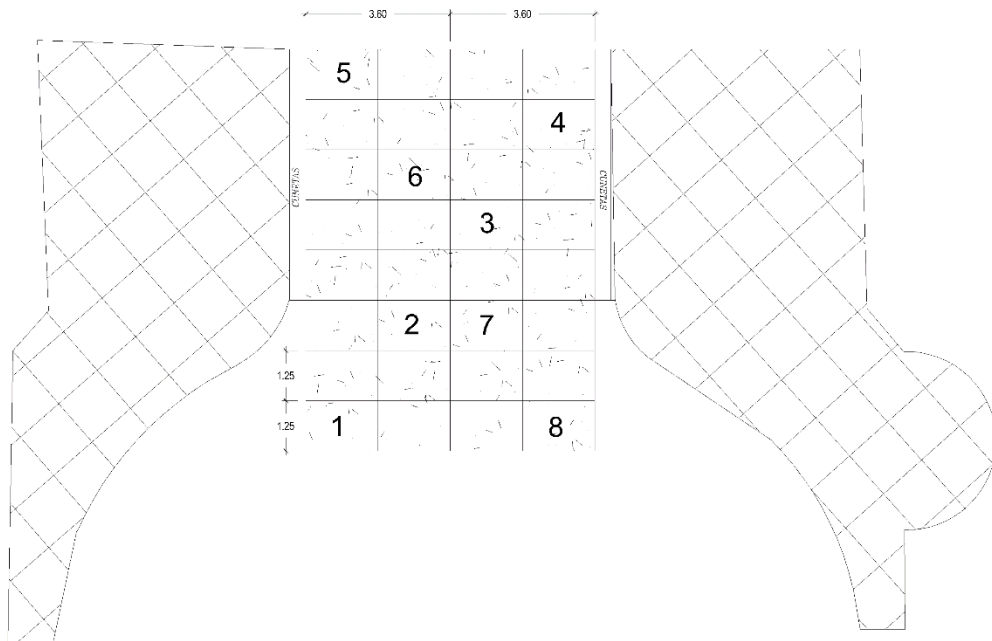


Figura 33. Puntos de ensayo de resistencia a la compresión con esclerómetro.

**Tabla 44.**  
**Resistencia a la compresión con esclerómetro**

# Ensayo	R	POSICION	F'c (kg/cm <sup>2</sup> )
1	44	+ 90°	428
2	48	+ 90°	523
3	44	+ 90°	428
4	48	+ 90°	523
5	48	+ 90°	523
6	46	+ 90°	474
7	46	+ 90°	474
8	48	+ 90°	523

**Nota:** Fuente: Elaboración propia



**Figura 34. Ensayo de esclerometría**

#### 4.7.2 Índice de rugosidad Internacional (IRI).

El IRI se midió de forma continua en la huella izquierda del pavimento, debido a que está es el sector más crítico, se hizo mediante levantamiento topográfico con un nivel de ingeniero.



**Figura 35. Levantamiento topográfico para determinar el IRI**

**Tabla 45.**

Determinación del IRI con nivel de ingeniero

PROGRESIV A	DISTANCI A	VISTA ATRÁS	ALTURA INSTRUMENTO	PERFIL L1	COTA
BM		1.426	101.426		100
0+000.00	0			1.333	100.093
0+000.50	0.5			1.334	100.092
0+000.100	1			1.332	100.094
0+000.150	1.5			1.335	100.091
0+000.200	2			1.337	100.089
0+000.250	2.5			1.335	100.091
0+000.300	3			1.337	100.089
0+000.350	3.5			1.335	100.091
0+000.400	4			1.335	100.091
0+000.450	4.5			1.331	100.095
0+000.500	5			1.333	100.093
0+000.550	5.5			1.333	100.093
0+000.600	6			1.332	100.094
0+000.650	6.5			1.339	100.087
0+000.700	7			1.334	100.092
0+000.750	7.5			1.334	100.092
0+000.800	8			1.335	100.091
0+000.850	8.5			1.334	100.092
0+000.900	9			1.333	100.093
0+000.950	9.5			1.334	100.092
0+001	10			1.335	100.091

**Nota:** Fuente: Elaboración propia

Debido a que el formato de reporte de las cotas de los perfiles de las huellas de circulación fue reportadas en extensión Excel, fue necesario convertir esta información a archivos con formato ERD para poder hacer uso del software PROVAL.

El archivo ERD es un formato de archivo estándar que se utiliza para almacenar números en forma de tabla, con las etiquetas de asistencia técnica automatizada de trazado y de procesamiento. Un archivo ERD contiene dos secciones independientes: la cabecera y los datos. La parte del encabezado contiene sólo texto, y la parte de datos contiene sólo números.

Para convertir las cotas topográficas a los formatos de números para el archivo ERD, se multiplicó las cotas topográficas por mil, posteriormente se formatearon los decimales a 5 unidades y mediante un proceso de concatenado se extrajeron las comas y se eliminaron los espacios en blanco; de esta forma, la información de las cotas topográficas quedan listas para ser adicionadas al archivo ERD.

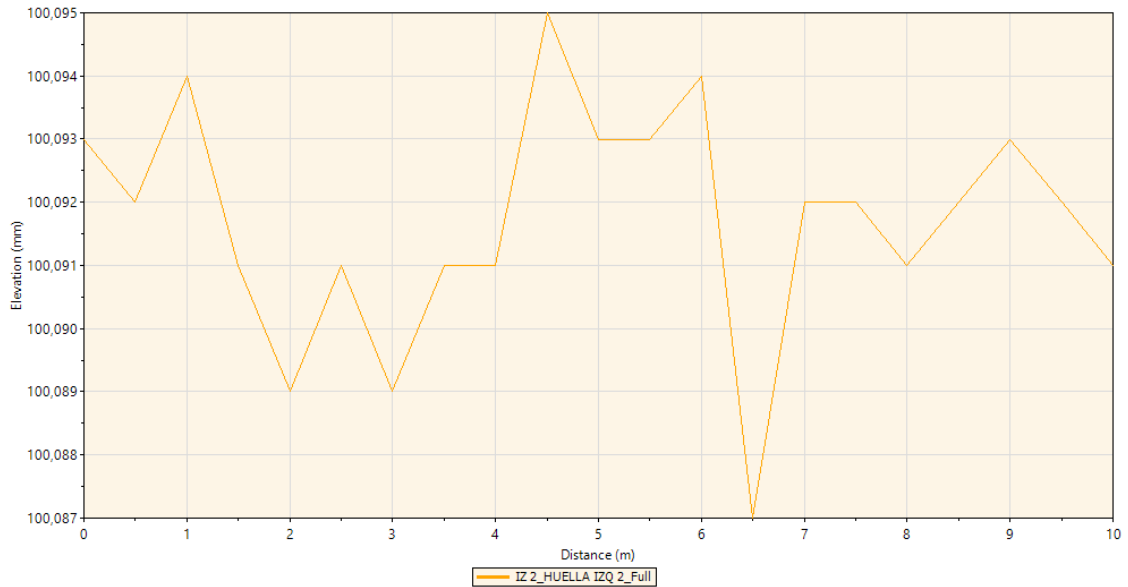
**Tabla 46**

Adaptación de las cotas topográficas al formato ERD.

<b>PROGRESIVA</b>	<b>CONVERSION PRELIMINAR I2</b>
0+000.00	100093
0+000.50	100092
0+000.100	100094
0+000.150	100091
0+000.200	100089
0+000.250	100091
0+000.300	100089
0+000.350	100091
0+000.400	100091
0+000.450	100095
0+000.500	100093
0+000.550	100093
0+000.600	100094
0+000.650	100087
0+000.700	100092
0+000.750	100092
0+000.800	100091
0+000.850	100092
0+000.900	100093
0+000.950	100092
0+001	100091

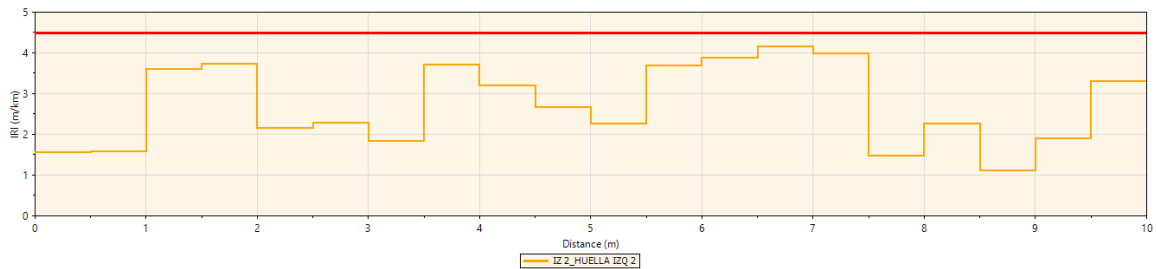
**Nota:** Fuente: Elaboración propia

Para realizar el cálculo de los valores de rugosidad para el IRI de diseño se utilizó el programa PROVAL en su versión 3.2. PROVAL es un programa de ingeniería gratuito que permite visualizar y analizar perfiles de pavimentos de diversas maneras; asimismo es un producto patrocinado y avalado por el departamento de transporte de los Estados Unidos, la FHWA y el programa de desempeño de pavimentos a largo plazo (LTPP).



**Figura 36. Visualización del perfil de las huellas de circulación del pavimento TCP**

Los archivos ERD de la huella analizados fueron cargados desde el mismo programa y su procesamiento fue configurado para que los valores de IRI resultantes sean calculados en intervalos de 0.5 metros; de esta forma, se obtuvo 20 valores de IRI.



**Figura 37. Visualización de los valores de rugosidad obtenido en intervalos de 0.5m**

**Tabla 47**

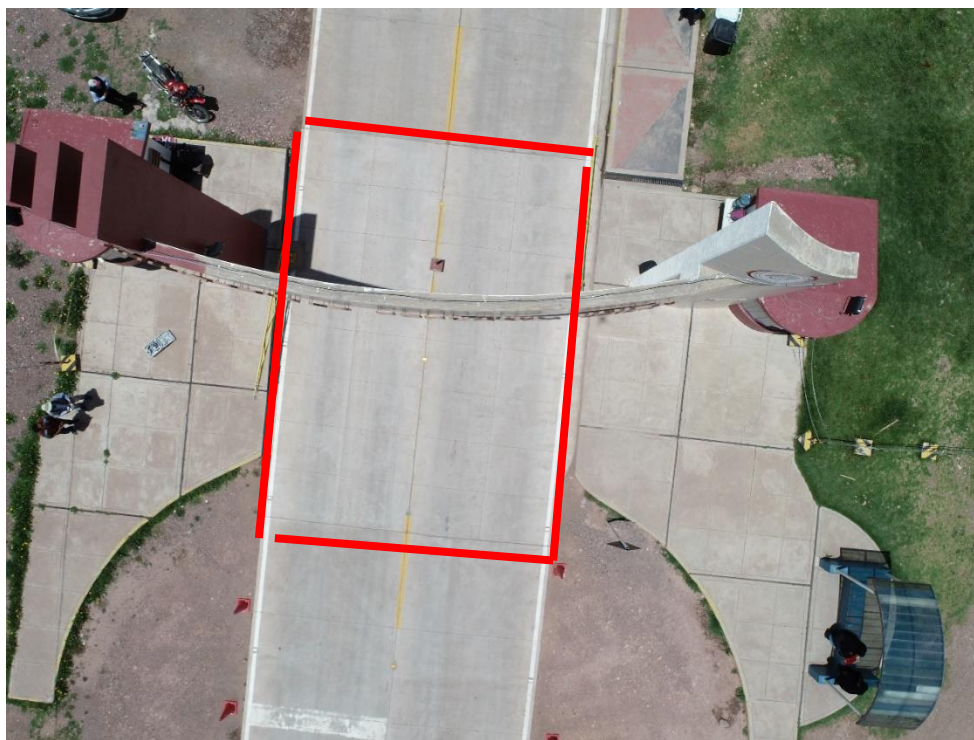
índice de rugosidad del pavimento TCP evaluado un año después

File	POSICION	IRI (m/km)
IZ 2	HUELLA IZQ	2.65872383

**Nota:** Fuente: Elaboración con software ProVAL 3.61.

### 4.7.3 Evaluación de fisuras mediante fotometría.

Se realizaron inspecciones visuales para detectar presencia de fallas o fisuras, con fotometría, para lo cuál se uso un drone DJI Phantom Pro, con una altura de 20m. La fecha de estudio fue el 12 de diciembre del 2019.



**Figura 38. Inspección visual con drone DJI Phantom**

Con una vida útil aproximada de un año, **NO** se encontraron fallas, fisuras o agrietamientos en el área total del pavimento de 7.20 m ancho x 10m de largo.

## 4.8 Discusión de resultados

### 4.8.1 Subrasante.

La metodología TCP, no contempla un mínimo de CBR, es por lo que se toma las recomendaciones que establecen las Especificaciones Técnicas para Carreteras norma MTC E 132, con un parámetro mínimo de 6% para proyectos ubicados mayor a 3000 msnm.

Del análisis de estudio de suelo que se hizo, se tienen (3) resultados de CBR, tomándose un promedio de estos que es 6.56%; el cuál es mayor que el parámetro mínimo exigido por la norma, por lo cual no es necesario tener un mejoramiento de la subrasante.

### 4.8.2 Subbase.

La metodología TCP recomienda que el espesor mínimo sea de 15 cm, teniendo que ser de un material granular con un porcentaje mínimo de finos menor a 6%, mismo que se cumple con la mezcla de canteras de Isla 55% y Vallecito 45%.

Dicha gradación cumple también con los parámetros mínimos exigidos por el Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas Generales como se aprecia en la tabla N° 39 Características físico-mecánicas de la subbase.

Teniendo 13 cm de espesor del pavimento rígido, la metodología TCP, recomienda que el CBR de la subbase este entre 50% y 80%; para el objeto de estudio, el CBR del material usado en la subbase tiene un 72.74 %, por lo cual se dice que la calidad del material usado es aceptable.

#### **4.8.3 Pavimento rígido TCP.**

Se obtuvo un espesor de losa de 0.13 cm., mediante la aplicación del programa OptiPave v.2, haciendo uso de concreto MR = 48 kg/cm<sup>2</sup> o f'c = 350kg/cm<sup>2</sup> (sin fibra)

El diseño contempla losas con paños de dimensiones 1.85 x 1.25 m , presentan juntas hechas con la cortadora de concreto de 2 mm de ancho y 3 cm de profundidad.

El slump puesto en obra, requerido para este tipo de concreto, es de 4" – 5.5, mismo que fueron controlados antes del vaciado del concreto premezclado.

Se hicieron ensayos de control de calidad de resistencia a compresión, mediante testigos cilíndricos, estos fueron elaborados con el concreto premezclado antes del vaciado, mismo que fueron extraídos de forma aleatoria, los resultados nos detallan que todos cumplen con los parámetros mínimos.

Mediante correlaciones de la ASTM se obtienen el módulo de ruptura o resistencia a la flexión del concreto, los cuáles también cumplen con el parámetro exigido por la metodología TCP de 4.58 MPa como de muestra en la tabla N° 40.

#### **4.8.4 Comparación con pavimento convencional.**

Se compara con el pavimento tradicional, en cuestión a espesor muestra 7 cm menos, esto influye directamente en el uso de materiales, mayor encofrado, mayor tiempo de vaciado, y mayor tiempo en el reglado y vibrado, esto produce una diferencia en el tiempo de construcción respecto a un pavimento más delgado, como es el TCP.

No se necesitan dowels, o pasajuntas, debido que estas se usan para la transmisión de cargas producidas por el paso de vehículos pesados, para el presente diseño el pavimento rígido absorbe todas las cargas sometidas y las transmite a las capas inferiores, razón por la cuál se incrementa el f'c del concreto, el grado de compactación y CBR de la subbase.

**Tabla 48*****Comparación de variables entre el pavimento TCP vs ASSHTO***

<b>INDICADOR</b>	<b>PAVIMENTO AASHTO</b>	<b>PAVIMENTO TCP</b>
Espesor	20 cm	13 cm
Resistencia a la compresión	210 kg/cm <sup>2</sup>	350 kg/cm <sup>2</sup>
Costo	116.01 soles /m <sup>2</sup>	87.89 soles /m <sup>2</sup>

**Nota:**Fuente: Elaboración propia

**4.8.5 Diferencias entre costos.**

De acuerdo con los resultados obtenidos del costo de un metro cuadrado de estructura, de demuestra que el pavimento diseño bajo la metodología TCP tiene una diferencia porcentual del costo de 21% más económico que uno diseñado bajo metodología AASHTO, esto debido a la disminución considerable del espesor y al incremento del valor estructural de la subbase.

Con dicho resultado obtenido se puede dar como aceptada la hipótesis planteada, puesto que el Pavimento TCP es más rentable económicamente.

**4.8.6 Método TCP.**

El método TCP (Losas con geometría Optimizada) es un sistema de diseño mecánico empírico frente a los métodos convencionales que utilizamos hasta la actualidad (ASSHTO 93) ya que el procedimiento de diseño y análisis calcula las respuestas del Pavimento (esfuerzos, deformaciones y deflexiones) y utiliza esas respuestas para calcular el incremento de daño a través del tiempo, por lo tanto es recomendable utilizar el método TCP ya que nos permite optimizar con una mayor precisión los recursos a través del software Optipave, el cual utiliza interinamente el procedimiento mediante elementos finitos.

Los pavimentos diseñados por el método TCP tienen, a diferencia de los construidos con métodos de tradicionales, una exigencia mayor a la base o subbase granular. Esta capa, bajo la losa de concreto, tiene dos funciones completamente distintas: La primera, debido al menor espesor, aumentar la capacidad estructural del sistema; y la segunda, es proveer una base que no se erosione bajo la junta del pavimento.

El concreto hidráulico que se utiliza en el diseño de pavimentos por el método TCP tiene una resistencia a la compresión mayor a 350 Kg/cm<sup>2</sup>, sin embargo los pavimentos tradicionales de concreto se diseñan por lo común con concretos iguales o mayores a 210 Kg/cm<sup>2</sup> dentro del rango de los ESALs que estamos considerando.



Así mismo la metodología TCP nos brinda una alternativa de optimizar nuestros pavimentos mediante Fibras Estructurales, sin embargo debido a los EE y el tipo de carretera, no es necesario su adición.

En el caso de pavimentos de hormigón con losa de espesor optimizado, las juntas (transversales y longitudinales) deben inducirse por aserrado utilizando un sistema autopropulsado, con una sierra de espesor menor o igual a 2.5 mm, debido a ello en las juntas de contracción no es necesario colocar las barras o dowells de transferencia de carga ya que demuestran que la transferencia de carga es debido al trabazón de los agregados ello fue demostrado en los estudios realizados por TCPAVEMENTS.

#### **4.8.7 Evaluación del pavimento con un año de vida útil.**

##### **4.8.7.1 Resistencia a la compresión.**

Se realizaron ensayos no destructivos con esclerómetro para medir la resistencia del pavimento, y se comprobó que incremento su resistencia, de los (8) puntos evaluados, el promedio de  $F'c = 487 \text{ kg/cm}^2$ , se ve el incremento en  $137 \text{ kg/cm}^2$  frente al  $F'c=350 \text{ kg/cm}^2$  de diseño, debido a que conforme pasa el tiempo el concreto incrementa su resistencia; teniendo esto en consideración se estima que la resistencia a la flexión del concreto también incremento.

##### **4.8.7.2 Índice de rugosidad (IRI).**

El índice de rugosidad internacional es usado con el propósito de medir el confort del vehículo al pasar sobre el pavimento.

En la figura N° 43 vemos los valores de rugosidad obtenidos a intervalos de 0.50m, esto debido al método topográfico con nivel de ingeniero, cuyas lecturas están en milímetros, que incrementa la precisión del IRI.

Luego de usar una metodología de cálculo usando el software ProVAL 3.61, nos estima un IRI de 2.6587 mm/km, que viene a ser el promedio de rugosidad en el tramo total de 10m.

Para el análisis de dicho valor tomaremos la norma de Chile, debido a que la metodología TCP también proviene de dicho país.

**Tabla 49**

Requerimientos De IRI según tipo de superficie bajo norma de Chile

NORMA	REQUERIMIENTOS DE IRI SEGÚN TIPO DE SUPERFICIE		
	METODOLOGIA	CONCRETO	TRATAMIENTO SUPERFICIAL
Ministerio de Obras			

Públicas de Chile	IRI obtenido en 1 tramos consecutivos de 200 mts. de secciones homogéneas (Media Móvil)	Promedio individual $\leq 2.8$ m/km	Promedio individual $\leq 4$ m/km
-------------------	---	-------------------------------------	-----------------------------------

**Nota:** Fuente: Ministerio de obras públicas de Chile.

Comparando el resultado del IRI del pavimento de un año de vida útil, con la cifra del software TCPavements que estima que a un año se tendría que tener un IRI=1.8 m/km como se detalla en la figura 26; se ve una diferencia esto es producido por:

- 1) La pendiente del pavimento
- 2) El escalonamiento producto del nivelado al momento de ser construido dicho pavimento.
- 3) Se midió el sector izquierdo (saliendo del campus), porque es el sector más crítico, debido a que al tener la garita de ingreso los vehículos aplican una acción de frenado y esto desgasta aún más la superficie del pavimento.

Considerando todos estos factores que afectan el IRI comparamos con el IRI de la norma chilena, y vemos que a pesar de ello aún se está dentro los límites estimados para un tramo individual, al tener  $2.65 < 2.8$  m/km.

#### **4.8.7.3 Fisuras o agrietamientos.**

En la figura N°45 se muestran los porcentajes de agrietamiento, sean grietas transversales, longitudinales o de esquina, donde se estima que no tendría que haber grietas o fisuras teniendo el pavimento un año de vida útil, y esto es comprobado con la inspección visual con drone.

A continuación comparamos con el pavimento contiguo de la metodología ASSHTO de espesor de 0.20m:



Figura 39. Fisuras en pavimento TCP  $e=0.13\text{m}$

Se contempla que el porcentaje de fisuras en el pavimento TCP es 0% conforme a la estimación del diseño bajo dicha metodología.

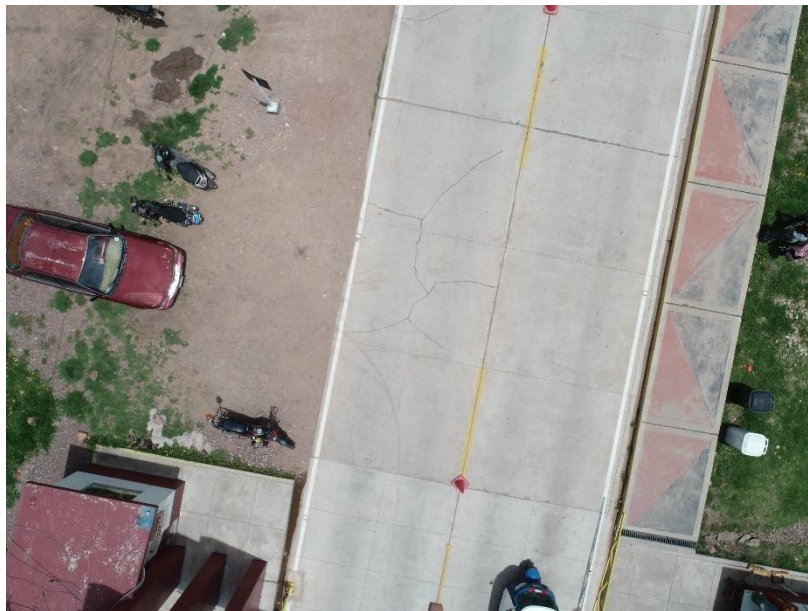


Figura 40. Fisuras en pavimento ASSHTO  $e=0.20\text{m}$

En el pavimento contiguo de la metodología ASSHTO, se contempla la presencia de grietas transversales y longitudinales en paños de igual medida.

Comparando ambos pavimentos con la misma vida útil de un año, vemos la diferencia, el pavimento TCP no falla ni se agrieta, mientras que el pavimento ASSHTO ya presenta fallas; todo esto da mayor valor a la metodología TCP.

## **4.9 Prueba de hipótesis**

El planteamiento de la hipótesis general de la presente investigación es la siguiente :

“La aplicación del tipo de pavimento TCP, presentará un mejor comportamiento técnico y económico frente a los pavimentos tradicionales para su empleo en el acceso principal de la UPeU”.

Por consiguiente, para realizar la validación de la hipótesis general se ha logrado mediante la prueba de las hipótesis específicas 1 y 2. Por lo tanto, a continuación se muestran las hipótesis específicas para la evaluación del comportamiento de los especímenes tratados con emulsión asfáltica y su influencia en los espesores de los pavimentos.

### **4.9.1 Prueba de las Hipótesis Específicas de la investigación.**

#### **4.9.1.1 Hipótesis N°01.**

El planteamiento de la hipótesis específica N°01 es la siguiente:

“El comportamiento técnico de la metodología TCP, PRESENTA diferencias entre el promedio del espesor y dimensiones frente a un pavimento rígido convencional.”

Para validar la hipótesis específica N° 01, se debe demostrar que existe una diferencia entre los espesores diseñados bajo una metodología TCP y ASSHTO (convencional) de 13 cm y 20cm respectivamente, la diferencia es de 07 cm; y la dimensión de la losa es de 1.20m x 1.80m, y 3.00m x 3.60m respectivamente. Concluyéndose que existen diferencias notables en dichas dimensiones.

#### **4.9.1.2 Hipótesis N°02.**

El planteamiento de la hipótesis específica N°03 es la siguiente:

“El costo de la metodología TCP, PRESENTA diferencias entre el promedio de costo frente a un pavimento rígido convencional”.

Para validar la hipótesis específica N° 02, se debe demostrar que existe una diferencia entre entre el promedio de costo de la metodología TCP y ASSHTO (convencional), teniendo una diferencia del 21, Concluyéndose que existen diferencias notables en dichos promedios de costos.

## **Capítulo V. Conclusiones y recomendaciones**

### **5.1 Conclusiones**

La tecnología de diseño de pavimentos TCP, cumple con las características necesarias para la duración planteada (20 años) y resistencia antes los EE 1,170,089; en cuanto al precio se presenta una reducción en el costo del pavimento TCP frente a un pavimento rígido tradicional, del 21%, por lo tanto la hipótesis es aceptada.

Se determinaron las dimensiones del pavimento con paños de 1.85 x 1.20m; y un espesor de 0.13m, con esta nueva propuesta donde se apoya un set de ruedas por cada losa, las tensiones se ven disminuidas con respecto a las producidas en las losas con dimensiones tradicionales, ello permitió reducir el pavimento en 7cm. Teniendo 15cm de base granular. Al aplicar esta metodología, se tienen dimensiones cortas, por lo que se tiene una disminución del alabeo y escalonamiento, lo que brinda confort al momento de transitar por dicha vía.

Se evaluaron las características y propiedades que deberían cumplir las estructuras del pavimento como: la carpeta de rodadura con un  $f'c = 350\text{kg/cm}^2$ , subbase de un CBR de 71% compactado al 100% y subrasante existente de 6.51% de CBR. Al comparar las estructuras de los pavimentos AASHTO y TCP, tiene un ahorro intangible en el tiempo de ejecución de este tipo de obras al construir una estructura con menor espesor, y que requiere un menor CBR de la subbase.

Se determinó el costo de la metodología TCP y su varianza respecto a la metodología AASHTO 93, con un 21% de diferencia; este dato es significativo debido a que se tienen proyectos de inversión pública que contemplan pistas y vereda de la ciudad de Juliaca, y que al usar esta metodología podrían generar un ahorro tangible de forma económica al tesoro público.

### **5.2 Recomendaciones**

Se recomienda el uso de concreto premezclado, por la garantía en cuanto a durabilidad y resistencia comprobadas en los ensayos de calidad de materiales y ensayos de resistencia (ver anexos)

Se recomienda tener operarios con experiencia en este tipo de trabajos pues por ser un método de pavimentación no muy difundida se debe tener sumo cuidado en el proceso constructivo.

Es necesaria una actualización en los métodos de diseño y constructivos. Es tarea para inversionistas (privados y públicos), contratistas y empresas del sector, proponer e implementar Mejores Prácticas Constructivas.

El Sistema TCPavement, es una herramienta para brindar una solución en pavimentos rígidos, frente a los flexibles, al mismo o menor costo; además de otras ventajas como la durabilidad.

## Referencias

American Association of State of Highway and transportation AASHTO- 1993. (2007) Guide for design of Pavement Structures. Estados Unidos: Washington.

BECERRA, M. (2012). Tópicos de Pavimentos de Concreto (Diseño, Construcción y Supervisión) .Peru. Editorial Flujo Libre.

BORDELON A., ROESLER J.R., y HILLER J.E. (2009). Mechanistic-Empirical Design Concepts for Jointed Plain Concrete Pavements in Illinois, Final Report, FHWA-ICT-09-052, Illinois Center for Transportation, University of Illinois, Urbana, IL, July 2009, 255 pp.

CHAVEZ, Victor (2005). Manual de Diseño geométrico de Vías Urbanas ICG. Recuperado de <https://civilgeeks.com/2017/04/25/manual-diseno-geometrico-vias-urbanas/>

CERVANTES V. y Roesler J.R. (2009), Performance of Concrete Pavements With optimized Slab Geometry. University of Illinois at Urbana-Champaign. Department of Civil and Environmental Engineering EE.UU.

CORONADO, Jorge. (2002). Manual Centro Americano de Pavimentos. Guatemala. SIECA.

COVARRUBIAS, Juan. (2012). Design of concrete pavement with optimized slab geometry. TCPavements, Santiago. CHILE

HILLER J.E. y ROESLER, J.R. (2005), Determination of Critical Concrete Pavement Fatigue Damage Locations Using Influence Lines, ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 131, No. 8, pp. 599-607.

MENÉNDEZ, José Rafael. (2012) Ingeniería De Pavimentos Materiales, Diseño y Conservación. 2da edición. Lima Perú.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS(2012). C. Difusión nuevas tecnologías y especificaciones técnicas, Dirección de Vialidad, Gobierno de Chile. Agosto, 2012.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS (2008). Especificaciones y métodos de muestreo, ensaye y control. Volumen 8. Dirección de Vialidad. Gobierno de Chile. Marzo 2008.

MINISTERIO DE OBRAS PUBLICAS (2008). Especificaciones Técnicas Generales de Construcción. . Volumen 5. Dirección de Vialidad. Gobierno de Chile. Marzo 2008.

MONTEJO, Alfonso. (2006) Ingeniería de Pavimentos para Carreteras. 1° edición. Lima, Perú:

MTC. (2013) Manual de Carreteras: Especificaciones Técnicas general de construcción. Perú.

MTC.(2014). Manual de carreteras: Suelos, Geología, Geotecnia y Pavimentos. Sección: Suelos y Pavimentos. Perú.

MVCS. (2010). Norma Técnica CE. 010 "Pavimentos Urbanos': Reglamento Nacional de Edificaciones (RNE) PERÚ

A. D. R. A. D. (2013) Control de los pesos y medidas vehiculares. Reglamento nacional de vehículos Decreto Supremo N 058-2003-MTC

PAT – PSR. Plan de Acondicionamiento Territorial de la Provincia de San Román. Municipalidad Provincial de San Romá. MTC. 2017.

RAO C.B., BARENBERG E.J., SNYDER M.B. y SCHMIDT S.K. (2001), Effects of Temperature and Moisture on the Response of Jointed Concrete Pavements. Proc. 7th International Conference on Concrete Pavements, Vol. 1, Orlando, FL, 23-38.

SAMPIERI, Robert H. (2010) Metodología de la Investigación. (5 ed) México. Editorial Mc Graw hill.

Sika Peru SA. (2014). HOJA TÉCNICA Sika® Fiber LHO 45/35 NB. Departamento Técnico. Perú.

TCPavements (2013). Guía de Usuario Optipave. Chile.

TCPavements. (2014.) Documentación y Guía de Diseño Optipave 2. Chile.

URBANISMO, M. D. V. Y. (2008). Código de Normas y Especificaciones Técnicas de Obras de Pavimentación. División Técnica de Estudio y Fomento Habitacional, octubre 2008, Santiago Chile.



# **ANEXOS**



TESIS	: APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PAVIMENTOS DE LOSAS CORTAS TCP EN LA VÍA DE ACCESO DE LA UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN, DISTRITO DE JULIACA - PUNO		
CANTERA	: CALICATA 01	AUTOR	: WILDO ALEXIS SUPO GUTIERREZ
MUESTRA	: SUBRASANTE - AGREGADO FINO	ASESOR	: HERSON DUBERLY PARI CUSI
UBICACIÓN	: PROGRESIVA 0 + 480	FECHA	: 03-dic-2018

ENSAYO: <b>ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO</b> NORMA ASTM - D 422 <b>CALICATA C - 01</b>	Nro de Estrato	: E - 08
	Nro de Muestra	: M - 01
	Prof. de la Muestra	: -1.50 m
	Clasificación SUCS	: SP Arena magra/meda, poco o nada de fines
	Clasificación AASHTO	: A - 3 Arena fina

TAMICES ASTM	ABERTURA (mm)	Peso Retenido (gr)	% Retenido Parcial	% Retenido Acumulado	% que pasa	Observaciones
3"	76.2	0.00	0.00	0.00	100.00	
2"	50.8	0.00	0.00	0.00	100.00	
1 1/2"	38.1	0.00	0.00	0.00	100.00	
1"	25.4	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/4"	19.05	0.00	0.00	0.00	100.00	
1/2"	12.7	0.00	0.00	0.00	100.00	
3/8"	9.53	8.00	1.60	1.60	98.40	
1/4"	6.35	12.00	2.40	4.00	96.00	
No4	4.75	13.00	2.60	6.60	93.40	
No10	2.00	108.00	21.60	28.20	71.80	
No20	0.84	136.00	27.20	55.40	44.60	
No30	0.59	56.00	11.20	66.60	33.40	
No40	0.42	58.00	11.60	80.20	19.80	
No 50	0.30	46.00	9.20	89.40	10.60	
No60	0.25	16.00	3.20	92.60	7.40	
No80	0.18	19.00	3.80	96.40	3.60	
No100	0.15	6.00	1.20	97.60	2.40	
No200	0.07	7.00	1.40	99.00	1.00	
BASE		5.00	1.00	100.00		
TOTAL		495.00				

**DESCRIPCIÓN DE LA MUESTRA**

Peso Inicial : 500.00 gr.  
 Peso Lavado : 495.00 gr.  
 Peso Perdido : 5.00 gr.

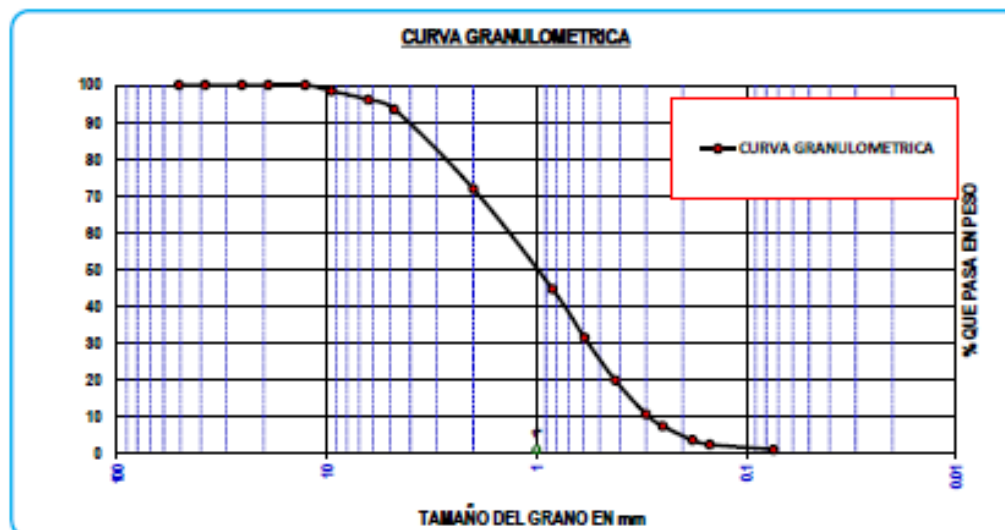
**LIMITES DE CONSISTENCIA**

Limite Líquido : NP  
 Limite Plástico : NP  
 Índice Plasticidad : NP

**CARACT. GRANULOMÉTRICAS**

D10= 0.29  
 D30= 0.57  
 D60= 1.37

CU= 4.73  
 CC= 0.81





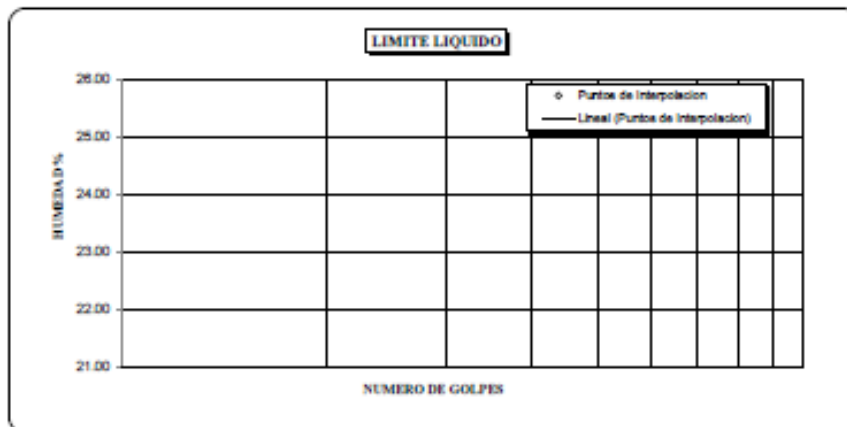
**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN – JULIACA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA - E. P. INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS**  
**Y CONCRETO**



TEBIS	: APLICACION DE LA TECNOLOGIA DE PAVIMENTOS DE LOSAS CORTAS TCP EN LA VIA DE ACCESO DE LA UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN, DISTRITO DE JULIACA – PUNO		
CANTERA	: CALICATA 01	AUTOR	: WILDO ALEXIS SUPO GUTIERREZ
MUESTRA	: SUBRASANTE - AGREGADO FINO	ASESOR	: HERSON DUBERLY PARI CUSI
UBICACION	: PROGRESIVA 0 + 480	FECHA	: 03-dic-2018

<b>ENSAYO:</b> <b>LIMITES DE CONSISTENCIA</b> NORMA ASTM - D 422 <b>CALICATA C - 01</b>	Nro de Estrato	: E - 03
	Nro de Muestra	: M - 01
	Prof. de la Muestra	: -1.50 m
	Clasificación SUCS	: SP Arena mediana, poco o nada de finos
	Clasificación AASHTO	: A - 3 Arena fina

DESCRIPCION	LIMITE LIQUIDO				LIMITE PLASTICO	
	01	02	03	04	01	02
Nro de ensayo						
Numero de Capsula						
Peso de Capsula + Suelo Humedo (gr)						
Peso de Capsula + Suelo Seco (gr)						
Peso del Agua (gr)						
Peso de Capsula (gr)						
Peso de Suelo Seco (gr)						
Contenido de Humedad (%)						
Numero de Golpes						



Limite Líquido : NP      Limite Plástico : NP      Índice de Plasticidad : NP



**UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN – JULIACA**  
**FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA - E. P. INGENIERIA CIVIL**  
**LABORATORIO DE SUELOS**  
**Y CONCRETO**



<b>TEBIS</b>	: APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA DE PAVIMENTOS DE LOSAS CORTAS TCP EN LA VÍA DE ACCESO DE LA UNIVERSIDAD PERUANA UNIÓN, DISTRITO DE JULIACA – PUNO		
<b>CANTERA</b>	: CALICATA 01	<b>AUTOR</b>	: WILDO ALEXIS SUPO GUTIERREZ
<b>MUESTRA</b>	: SUBRASANTE - AGREGADO FINO - EXTRAIDO IN SITU	<b>ASESOR</b>	: HERSON DUBERLY PARI CUSI
<b>UBICACIÓN</b>	: PROGRESIVA 0 + 480	<b>FECHA</b>	: 03-09-2018

<b>ENSAJO:</b>  <b>CBR</b>  NORMA ASTM - D3080-08 <b>SUB RASANTE</b>	<b>Nro de Muestra</b>	: M - 01
	<b>Densidad Natural Seca</b>	: 2.04 %
	<b>Humedad Natural</b>	: 2.35 %
	<b>Area del Piston</b>	: 19.35 cm <sup>2</sup>
	<b>Expansión Máxima</b>	: (INSITU)

DESCRIPCION		CONTROL DE DENSIDAD					
N° de ensayo	1	2		3			
Numero de golpes por capa	IN SITU	IN SITU		IN SITU		IN SITU	
Nro de Molde	M-001	M-009		M-003			
Peso de Molde (gr)	8736	7769		8310			
Volumen de Molde (cm <sup>3</sup> )	2141.21	2151.09		2035.01			
Condición de la muestra	IN SITU	IN SITU		IN SITU			
Peso del material + Molde (gr)	12791	12235		12951			
Peso del material (gr)	4055	4466		4541			
Peso volumétrico húmedo (gr/cm <sup>3</sup> )	1.89	2.08		2.28			

DESCRIPCION		CONTROL DE HUMEDAD					
Nro de Tare	T-023	T-003	T-009	T-011	T-013	T-027	
Peso de Tare (gr)	16.18	16.38	20.78	22.38	16.01	16.62	
Peso de Tare + Suelo Húmedo (gr)	64.96	59.6	95.29	88.79	75.71	77.95	
Peso de Tare + Suelo seco (gr)	58.5	53.97	85.81	80.48	66.08	68.32	
Peso del agua (gr)	6.46	5.63	9.48	8.33	9.63	9.63	
Peso del suelo seco (gr)	340	312	340	340	377	382	
Contenido de humedad (%)	1.90%	1.80%	2.85%	2.45%	2.55%	2.52%	
Contenido de humedad Promedio (%)	1.85%		2.65%		2.54%		
Peso Volumétrico Seco (gr/cm <sup>3</sup> )	1.86		2.02		2.22		

DESCRIPCION		CONTROL DE LA EXPANSION						
Altura de la muestra								
Fecha	Hora	Tempo	Lectura (")	Expansión (%)	Lectura (")	Expansión (%)	Lectura (")	Expansión (%)

DESCRIPCION		CONTROL DE LA PENETRACION						
Penetración (mm)	Tiempo (min)	Carga Estática	Lectura (kg)	Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> )	Lectura (kg)	Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> )	Lectura (kg)	Esfuerzo (Kg/cm <sup>2</sup> )
0	00:00		0.00	0.00	0	0.00	0	0.00
0.64	00:30		4.50	0.23	5	0.26	10	0.51
1.27	01:00		13.50	0.69	17	0.87	26	1.34
1.91	01:30		34.50	1.77	42.5	2.19	51.5	2.65
2.54	02:00		68.00	3.50	79.5	4.09	88	4.53
3.81	03:00		182.50	9.39	175	9.00	187	9.62
5.08	04:00		329.00	16.92	294	15.12	298	15.33
6.35	05:00		465.00	23.92	406	20.88	404	20.78
7.62	06:00		539.00	27.73	525	27.00	500	25.71
8.89	07:00		632.00	32.51	625	32.14	583	29.98
10.16	08:00		687.00	35.34	761	39.14	650	33.43