

Facultad de Tecnología de la Construcción

**“DISEÑO DE ESTRUCTURA DE
PAVIMENTO RÍGIDO USANDO EL
MÉTODO DE LA PCA PARA EL
TRAMO DE CAMINO DE 1.02 KM DE
LAS COMARCAS CUAJACHILLO #1 –
NEJAPA, DEL MUNICIPIO DE CIUDAD
SANDINO, DEPARTAMENTO DE
MANAGUA”.**

Trabajo Monográfico para optar al título de
Ingeniero Civil

Elaborado por

Tutor:

Br. Erdin Eliezer Altamirano Mayorquin
Carnet: 2015-0936U

Ing. Aldo José Zamora Lacayo

10 de octubre de 2023
Managua, Nicaragua

Agradecimiento

Doy gracias primero a Dios, creador de los cielos y de la tierra por permitir llegar hasta este punto de mis estudios, por el ánimo, fuerza y los conocimientos alcanzado para poder culminar mis estudios universitarios.

A mis padres, María Elena Mayorquin Ruiz y Jairo Ramón Martínez Pérez por todo su apoyo y consejos durante todo este tiempo el cual fue fundamental para lograr esta meta.

Al Ingeniero Aldo José Zamora Lacayo por sus valiosas orientaciones, permitiendo una buena dirección para realizar esta tesis.

A todo aquel que estuvo en los buenos y malos momentos, al que me brindo su ayuda, un consejo, al que me animo a seguir adelante... Muchas Gracias.

Resumen Ejecutivo

En este documento se presenta el diseño de la estructura de pavimento rígido del tramo de camino de 1.02 km de las comarcas Cuajachillo # 1 – Nejapa del municipio de Ciudad Sandino, departamento de Managua.

Para tal efecto se abarcaron los distintos estudios en los que se subdivide esta investigación, los cuales se resumen en cinco capítulos que se describen a continuación:

Capítulo I. Generalidades: Abarca las generalidades del proyecto como es la definición del pavimento rígido y este como alternativa de construcción, la localización y ubicación de este, los antecedentes de la vía en estudio y la justificación de la importancia de mejorar el tramo de camino con una estructura de pavimento.

Capítulo II. Estudio de Tránsito: Corresponde a los estudios de tránsito que tiene que ver con los volúmenes de tránsito que circulan por la vía, así como el cálculo de Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA), la proyección del tránsito futuro del tramo en estudio y el cálculo de repeticiones esperadas por peso y tipo de ejes.

Capítulo III. Estudio de Suelos: Encierra los estudios de suelos realizados a lo largo del tramo entre los cuales están las pruebas de laboratorio realizadas a material proveniente de la vía y fuentes de materiales, su clasificación y el trazado del perfil estratigráfico, la determinación del porcentaje de C.B.R y la funcionalidad de los materiales estudiados.

Capítulo IV. Diseño de la Estructura de Pavimento Rígido por el Método de la Portland Cement Association (PCA): Consiste en la parte más importante de esta investigación que es el diseño de la estructura de pavimento, la cual incluye la determinación de los factores de diseño, el análisis de daño por fatiga y de erosión a la que está sometido la estructura de pavimento con el fin de determinar el espesor óptimo de la losa de concreto sin dejar afuera la determinación de las dimensiones de esta y el tipo de barra pasajuntas y de amarre y su diseño de junta.

Conclusiones y Recomendaciones: Esta es la parte culminante de la investigación y brindan las conclusiones y recomendaciones de cada capítulo abordado.

Contenido

CAPÍTULO I. GENERALIDADES	1
1.1 Introducción.....	1
1.2 Antecedentes	4
1.3 Justificación.....	5
1.4 Objetivos	6
1.4.1 Objetivo General	6
1.4.2 Objetivos Específicos	6
CAPÍTULO II. ESTUDIO DE TRÁNSITO	7
2.1 Introducción.....	7
2.2 Volúmenes de tránsito	7
2.3 Conteo vehicular.....	8
2.4 Tránsito Promedio Diario (TPD).....	13
2.4.1 Tránsito Promedio Diurno (12 horas)	13
2.5 Proyección del Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA)	15
2.5.1 Procedimiento de elección de los factores de ajuste	15
2.6 Pronóstico de volúmenes de tránsitos	23
2.7 Tasas de crecimiento de variables relacionadas al tránsito	23
2.7.1 Determinación de tasas de crecimiento.....	26
2.8 Proyección de tránsito futuro	28
2.9 Repeticiones esperadas	36
2.9.1 Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA).....	37
2.9.2 Factor Sentido (FS).....	37

2.9.3 Factor Carril (FC)	38
2.9.4 Periodo de Diseño	38
2.9.5 Factor de Crecimiento Anual (FCA)	39
2.9.4 Cálculo de Repeticiones Esperadas.....	39
CAPÍTULO III. ESTUDIO DE SUELOS	43
3.1 Introducción.....	43
3.2 Trabajos de campo	43
3.2.1 A lo largo del trazado de la vía.....	43
3.2.2 En las áreas de fuentes de materiales	43
3.3 Sondeos manuales.....	44
3.4 Trabajos de laboratorio.....	44
3.5 Resultado de los trabajo de laboratorio	45
3.5.1 A lo largo del trazado de la vía.....	45
3.5.2 Funcionalidad de los materiales a lo largo de trazado de la vía	66
3.6 Cálculo del C.B.R. de diseño	68
3.7 En las áreas de fuentes de materiales.....	70
3.7.1 Humedad y límites de Atterberg	71
3.7.2 Granulometría y clasificación H.R.B.....	72
3.7.3 Compactación de suelo (Proctor Modificado)	73
3.7.4 Relación de soporte de California (C.B.R.).....	76
3.7.5 Funcionalidad de los materiales en la fuente de material	77
CAPÍTULO IV. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO POR EL MÉTODO DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA)	79
4.1 Introducción.....	79
4.2 Factores de diseño	80
4.2.1 Resistencia del concreto a la flexión (módulo de ruptura, MR)	80
4.2.2 Resistencia de la subrasante, o subrasante y subbase combinadas (k)80	

4.2.3 Los pesos, frecuencias, y tipos de cargas axiales que el pavimento soportara	83
4.2.4 Periodo de diseño	84
4.3 Factor de seguridad de carga	84
4.4 Esfuerzo equivalente	85
4.5 Relación de esfuerzo	86
4.6 Análisis por fatiga	87
4.6.1 Daño por fatiga	90
4.7 Análisis por erosión	90
4.7.1 Factor de erosión	90
4.7.2 Daño por erosión	93
4.8 Cálculo de espesor de losa de concreto	93
4.9 Modulaci3n de losa.....	95
4.10 Barras pasajuntas y barras de amarre	97
4.10.1 Barras pasajuntas	97
4.10.2 Barras de amarre	98
4.11 Dise1o de junta	99
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	102
BIBLIOGRAFIA.....	105
ANEXOS.....	I

CAPÍTULO I. GENERALIDADES



1.1 Introducción

En la actualidad es de suma importancia para un país que su red vial este en buen estado debido al dinamismo económico que puede haber en la zona. Es por eso que dependiendo de los volúmenes del tránsito y las características del mismo, según las actividades económicas del lugar se pretenda realizar diseños de pavimentos adecuados para que estos no sufran daños al verse ocupado por el tránsito vehicular y esta pueda cumplir con su periodo de diseño.

Para tal objetivo, se emplean distintos tipos de pavimento entre los cuales están el flexible, rígido y articulado; dependiendo de las necesidades del tráfico, de la durabilidad deseada (periodo de diseño) y de su costo de mantenimiento. En estas situaciones, el pavimento rígido se puede considerar una alternativa ya que una vez construido su costo de mantenimiento es mínimo en comparación con su costo de construcción y tiene una durabilidad de 20 a 40 años.

Los pavimento rígido son aquellos que están fundamentalmente constituidos por una losa de concreto hidráulico, apoyada sobre la subrasante o sobre una capa, de material seleccionado, la cual se denomina subbase del pavimento rígido.

En el presente estudio se pretende realizar un análisis sobre la problemática que ocurre en el tramo de camino de las comarcas Cuajachillo # 1 – Nejapa que tiene una longitud de 1.02 km, ubicado en el municipio de Ciudad Sandino del departamento de Managua (ver macro localización y micro localización en imagen 1 y 2, páginas 2 y 3).

Las actividades económicas que se desarrollan en ambas comunidades son la ganadería y agricultura. Muchas veces la comercialización de los productos de una comarca a otra se vuelve difícil debido a que la vía principal de comunicación actualmente se encuentra en muy mal estado causando que el viaje sea tardado e incómodo para el usuario debido a que no existe una estructura de pavimento.

Por lo tanto se pretende proporcionar una mejor superficie de rodamiento a través del diseño de una estructura de pavimento rígido que facilite la circulación de los

vehículos y peatones trayendo consigo una mejor opción del dinamismo socioeconómico de ambas comarcas.

Para esto se utilizará el método de la Portland Cement Association (PCA) establecido para este tipo de diseño.

Al finalizar esta investigación se planteará una solución a la problemática proponiendo la mejor alternativa de estructura de pavimento rígido.

La vía está localizada en el municipio de ciudad Sandino, departamento de Managua con coordenadas: 12° 09' 15" latitud norte y 86° 21' 02" longitud Oeste.

Ciudad Sandino limita al norte con el municipio de Mateare; al sur con las comarcas de Chiquilistagua y Nejapa; al este con el Distrito II de Managua y al oeste con el municipio de Villa Carlos Fonseca.

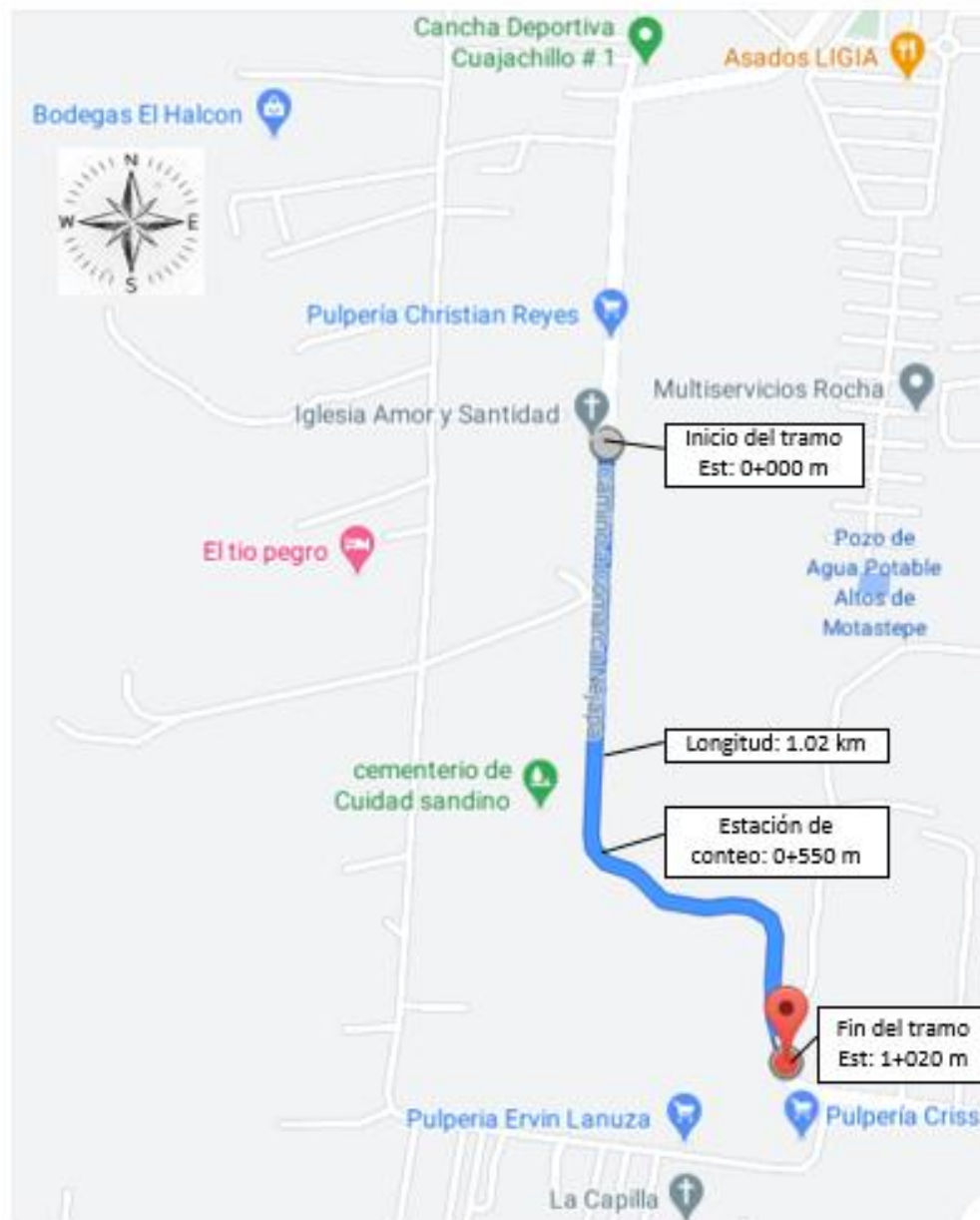
Imagen 1: Mapa de macrolocalización del proyecto



Fuente: https://www.familysearch.org/es/wiki/Managua,_Nicaragua_-_Genealog%C3%ADa

De igual manera, el tramo de camino se ubica entre las comarcas de Cuajachillo # 1 y Nejapa con coordenadas iniciales: 12° 07' 30" latitud norte y 86° 20' 44" longitud Oeste, y coordenadas finales: 12° 07' 03" latitud norte y 86° 20' 36" longitud Oeste.

Imagen 2: Mapa de microlocalización del proyecto



Fuente: <https://www.google.com/maps/@12.12103,-86.3418306,16z?entry=ttu>

1.2 Antecedentes

En el tramo de análisis la superficie de rodamiento en la actualidad es suelo natural, por lo cual en temporada de invierno se produce sedimento por el pasar de los vehículos provocando que estos se queden atascados y causa daños en los vehículos. También se producen charcas de tamaño considerable por la existencia de baches en una parte del camino.

En años anteriores nunca se ha procurado la realización del mejoramiento del camino ni tampoco la pavimentación del mismo, esto ha traído consigo el deterioro de la vía.

La vía es poco transitada en comparación con años anteriores donde la afluencia de vehículos era mucho mayor, pero que ahora ha disminuido a causa de su mal estado a pesar de ser la principal vía de comunicación entre las dos comarcas.

En el 2020 se realizó la inauguración de un nuevo cementerio que está ubicado contiguo a la trayectoria del camino y al cual es difícil llegar por las condiciones del camino.

1.3 Justificación

El presente trabajo consiste en el diseño de una estructura de pavimento rígido ante la problemática presente en el tramo de camino de 1.02 km de las comarcas Cuajachillo #1 y Nejapa.

El tramo en estudio es de suma importancia ya que es la vía principal de comunicación entre las comarcas, por lo tanto debe ser prioridad que esta pueda estar en buenas condiciones, no solo para el tránsito de peatones sino que también por los vehículos particulares y comerciales que circulan por la vía para llegar de una comarca a otra.

Esta vía es utilizada por los conductores como alternativa para acortar los viajes, reducir costos de operación y lograr un acceso más rápido a las carreteras principales de la ciudad de Managua y carretera nueva a León, situación que beneficia a ambas comarcas.

Además sería significativo la optimización del tiempo de viaje, proporcionando un viaje más rápido, cómodo y seguro que permita evitar accidentes de tránsito en el futuro.

Ante esta situación, este estudio pretende dar respuesta a esta problemática que perjudica a ambas comunidades presentando recomendaciones técnicas para mejoramiento de la vía y que permita optimizar las condiciones de vida de las habitantes y un mejor desarrollo económico de las comarcas.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

- Diseñar la estructura de pavimento rígido para el tramo de camino de 1.02 km de las comarcas Cuajachillo # 1 – Nejapa aplicando el método de la Portland Cement Association (PCA).

1.4.2 Objetivos Específicos

- Efectuar estudio de tránsito para conocer el número de repeticiones esperadas por cada tipo de eje a la que estará sometida la estructura de pavimento rígido durante el periodo de diseño.
- Realizar estudio de suelo para determinar las características físico-mecánicas de los suelo a lo largo del tramo y de los bancos de materiales que permitan evaluar su uso en el diseño de la estructura de pavimento.
- Diseñar los espesores requeridos de la estructura de pavimento rígido para soportar las cargas de diseño durante su vida útil, utilizando el criterio de diseño de la PCA.

CAPÍTULO II. ESTUDIO DE TRÁNSITO



2.1 Introducción

Una de las variables más importantes del diseño de pavimento es el tránsito, debido a su incidencia en el dimensionamiento de los distintos elementos que integran al pavimento. Lo importante es conocer la composición y el volumen del tránsito, esto permitirá obtener una mejor estructura capaz de soportar las cargas aplicadas por los vehículos que circulen durante su periodo de diseño.

Cabe destacar que, para los estudios de tránsito es necesarios conocer información básica como: tipología y volumen. Esto permite realizar proyecciones de cada tipo de eje de los distintos vehículos que circulan por la vía, proporcionando el número de repeticiones por eje a la que estará sometida la estructura de pavimento durante su vida útil, brindando un diseño resistente y durable ante la aplicaciones de cargas de los vehículos.

La información de estos estudios también es utilizada para proyecciones de volúmenes de vehículos en el futuro, tales proyecciones se realizan en un periodo igual al tiempo de diseño de la estructura de pavimento.

De esta manera, se llevan a cabo cálculos razonables del tránsito que permiten una mejor evaluación de los distintos elementos que componen la estructura al momento de su diseño.

2.2 Volúmenes de tránsito

Por lo anterior, se define volumen de tránsito, como el número de vehículos que pasan por un punto o sección transversal dados, de un carril o de una calzada, durante un período determinado, y se expresa como:

$$Q = \frac{N}{t} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

Q = vehículos que pasan por unidad de tiempo (vehículos/período)

N = número total de vehículos que pasan (vehículos)

t = período determinado (unidades de tiempo)

2.3 Conteo vehicular

Un conteo vehicular consiste en determinar la cantidad y tipos de vehículos que circulan en determinado lugar en un tiempo determinado.

Para esta investigación se realizó un conteo durante tres días consecutivos según lo indicado por el anuario de aforo de tráfico año 2020 del MTI, página 8, realizándose los días: Martes 27, Miércoles 28 y Jueves 29 del mes de Julio del año dos mil veinte y uno. El tiempo aforo por día fue de 12 horas continuas, iniciando a las 6:00 a.m. y finalizando a las 6:00 p.m. El conteo fue realizado en intervalos de tiempo de 15 minutos.

Para este caso, el conteo volumétrico no se efectuó durante un período en que el tránsito por la zona en estudio, fuese irregular por diversas causas: desvío de un camino, fiestas patronales, construcción de un camino aledaño, etcétera.

El Conteo Volumétrico de tránsito se ejecutó por conteo manual en ambas sentidos (Cuajachillo # 1 – Nejapa, Nejapa – Cuajachillo # 1), utilizando como estación de conteo el estacionamiento 0+550 m.

En anexos, tablas 55, 56 y 57, página I, II y III se muestran más detallados el resumen del conteo vehicular de 12 horas por tipo de vehículos en periodos de 1 hora de los días martes, miércoles y jueves.

A continuación se muestra el resumen de los resultados obtenidos del conteo vehicula por día y tipo de vehículos:

Tabla 1: Resumen del conteo vehicular de 12 horas por tipo de vehículo en ambos sentidos

Estación: 0+550 m								Sentido					
Tramo: Cuajachillo # 1 – Nejapa								Cuajachillo # 1 – Nejapa					
Fecha: del 27 al 29 de Julio del 2021								Nejapa – Cuajachillo # 1					
Día	Motos	Vehículos de Pasajeros						Vehículos de Carga				Equipo Pesado	TOTAL (Veh/12hr)
		Autos	Jeep	Camionetas	McBus <15 s.	MnBus 15-30 s.	Bus 30+ s.	Liv. 2-5 t	C2 5 + t	C3	T3 - S2	Otros	
Martes 27/07/21	230	100	25	76	16	4	2	17	23	3	0	27	523
Miércoles 28/07/21	243	110	27	97	12	2	2	30	24	2	1	21	571
Jueves 29/07/21	234	117	22	81	13	4	1	26	13	0	1	14	526
Total / Veh	707	327	74	254	41	10	5	73	60	5	2	62	1620
% TRÁNSITO	43.64%	20.19%	4.57%	15.68%	2.53%	0.62%	0.31%	4.51%	3.70%	0.31%	0.12%	3.83%	100.0%
	87.22%						8.95%					3.83%	100.0%
	% VEHICULOS LIVIANOS						% VEHICULOS PESADOS						

Fuente: Elaboración Propia

Según lo registrado en el conteo, los vehículos que más circulan por la vía son los de pasajeros predominando las motos (43.64%), autos (20.19%), jeep (4.57%) y camionetas (15.68%). Dentro del grupo de autobuses se encontró que el que más circula es el microbús con un 2.53%, seguido por una cantidad menor de minibús y buses (mayores de 30 pasajeros) con el 0.62% y 0.31% respectivamente. Se encontró que en la clasificación de los vehículos de carga los más dominantes son los camiones catalogados como liviano (2-5 t) con un 4.51% y C2 (5 + t) con un 3.70%, con una menor cantidad de camiones tipo C3. En esta misma categoría se observó que no circularon camiones remolques del tipo C2-R2 y C3-R2 durante los tres días de conteo, caso contrario sucedió con los tráiler articulados que si se tuvo registro del tipo T3-S2 pero en poca cantidad para un 0.12%.

A continuación se presenta el cálculo de los porcentajes correspondientes a cada tipo de vehículo, tomando en cuenta el sentido en que circulan:

Ejemplo de cálculo para las motos en el sentido Cuajachillo # 1 - Nejapa:

Se divide el total de motos que circula en este sentido entre la sumatoria total de los vehículos y se multiplica por cien.

$$\% \text{ de distribución por sentido} = \frac{\text{Total de motos}}{\text{Suma total de vehiculos del sentido a calcular}} * 100 \quad (\text{Ec. 2})$$

$$\% \text{ de distribución por sentido} = \frac{343 \text{ VPD}}{831 \text{ VPD}} * 100 = 41.28 \%$$

De la misma manera se realizan los cálculos para los demás tipos de vehículos.

Ejemplo de cálculo para los vehículos en el sentido Cuajachillo # 1 - Nejapa:

El porcentaje de vehículos por sentido es igual a la división del total de los vehículos que circulan en uno de los sentidos entre la suma total de vehículos que circulan en ambos sentidos.

$$\% \text{ de vehiculo por sentido} = \frac{\text{Total de los vehículos que circulan en uno de los sentidos}}{\text{Suma total de vehículos que circulan en ambos sentidos}} * 100 \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\% \text{ de vehiculo por sentido} = \frac{831 \text{ VPD}}{1620 \text{ VPD}} * 100 = 51.31 \%$$

De la misma manera se realiza el cálculo para el otro sentido.

En la tabla 2 se presentarán los porcentajes correspondientes a cada tipo de vehículo, tomando en cuenta el sentido en que circulan:

Tabla 2: Porcentaje y distribución de vehículos por sentido

Sentido	Motos	Vehículos de Pasajeros						Vehículos de Carga				Equipo Pesado	TOTAL (VPD)	% de vehículo por sentido
		Autos	Jeep	Cam.	McBus <15 s.	MnBus 15-30 s.	Bus 30+ s.	Liv. 2-5 t	C2 5 + t	C3	T3 - S2	Otros		
Cuajachillo # 1 - Nejapa	343	180	31	143	24	5	3	39	25	3	2	33	831	51.30%
% de distribución por sentido	41.28%	21.66%	3.73%	17.21%	2.89%	0.60%	0.36%	4.69%	3.01%	0.36%	0.24%	3.97%	100%	
Nejapa - Cuajachillo # 1	364	147	43	111	17	5	2	34	35	2	0	29	789	48.70%
% de distribución por sentido	46.13%	18.63%	5.45%	14.07%	2.15%	0.63%	0.25%	4.31%	4.44%	0.25%	0.00%	3.68%	100%	
Total / Veh	707	327	74	254	41	10	5	73	60	5	2	62	1620	100%
% por tipo de vehículo	43.64%	20.19%	4.57%	15.68%	2.53%	0.62%	0.31%	4.51%	3.70%	0.31%	0.12%	3.83%	100%	

Fuente: Elaboración Propia

2.4 Tránsito Promedio Diario (TPD)

Tránsito Promedio Diario, es el número total de vehículos que pasan durante un periodo dado (en días completos) igual o menor a un año y mayor que un día, dividido entre el número de días del periodo, medido en vehículos por día. Su abreviatura es TPD.

Este cálculo se puede realizar mediante la siguiente ecuación:

$$TPD = \frac{N}{1 \text{ día} \leq T \leq 1 \text{ año}} \quad (\text{Ecuación 4})$$

Donde:

N = número de vehículos que pasan en T días.

T = número de días del conteo.

2.4.1 Tránsito Promedio Diurno (12 horas)

Se define el Tránsito Promedio Diurno, como el número total de vehículos que pasan durante un periodo de 12 horas, dividido entre el número de días de conteo, medido en vehículos cada 12 horas. Su abreviatura es TPD_i.

Este cálculo se puede realizar mediante la siguiente ecuación:

$$TPD_i = \frac{\text{Numero total de vehiculos en 12 horas}}{\text{Numero de días}} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Se procedió a calcular el TPD_i, para los distintos tipos de vehículo utilizando la suma total de vehículos que circulan por la vía durante los tres días.

Un ejemplo de cálculo del TPD_i sería el dividir la cantidad de motos entre el total de días de conteo que es igual a:

$$TPD_i = \frac{707 \text{ vehiculos}}{3 \text{ día}} = 236 \text{ vehiculos/día}$$

De igual manera se harán los cálculos de los demás tipos de vehículos.

En la tabla siguiente se presentan los datos recopilados en campo y el resultado obtenido de TPD_i:

Tabla 3: Tránsito Promedio Diurno TPD_i por tipo de vehículo en ambos sentidos

Tramo: Cuajachillo # 1 - Nejapa													
Sentido							Cuajachillo # 1 – Nejapa						
							Nejapa – Cuajachillo # 1						
Día	Motos	Vehículos de Pasajeros						Vehículos de Carga				Equipo Pesado	TOTAL (Veh/12hr)
		Autos	Jeep	Camionetas	McBus <15 s.	MnBus 15-30 s.	Bus 30+ s.	Liv. 2-5 t	C2 5 + t	C3	T3 - S2	Otros	
Martes 27/07/21	230	100	25	76	16	4	2	17	23	3	0	27	523
Miércoles 28/07/21	243	110	27	97	12	2	2	30	24	2	1	21	571
Jueves 29/07/21	234	117	22	81	13	4	1	26	13	0	1	14	526
Total / Veh	707	327	74	254	41	10	5	73	60	5	2	62	1620
TPD _i (Veh/12hr)	236	109	25	85	14	4	2	25	20	2	1	21	544

Fuente: Elaboración Propia

2.5 Proyección del Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA)

El Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA) se define como el volumen total que pasa por una sección transversal o por un segmento de una carretera, en ambos sentidos, durante un año, dividido entre el número de días del año. La ecuación se define como:

$$TPDA = \frac{TA}{365 \text{ días}} \text{ (Ecuación 6)}$$

Donde:

TA = Tránsito Anual.

365 = Días del año.

En este caso, como no conocemos el volumen total de vehículos que circula por la vía durante un año, se realizará la proyección de este volumen empleando el conteo de tres días para estimar este valor.

El conteo tuvo una duración de 12 horas por día, de 6:00 a.m. a 6:00 p.m., por lo tanto el TPD_i se tendrá que expandirse a TPDA utilizando los factores día, semana y de expansión.

Par tal fin se utilizará el anuario de tráfico del año 2020 que actualmente es el más reciente, emitido por el Ministerio de Transporte e Infraestructura (MTI). De esta manera se obtendrá los factor día, semana y de expansión; necesarios para realizar las proyección del TPD_i a TPDA.

2.5.1 Procedimiento de elección de los factores de ajuste

El vector geográfico a la cual pertenece la estación de conteo utilizada según el anuario de aforo de tráfico es el vector R2, código PN que pertenece a la región de pacifico norte debido a que el proyecto está situado en el departamento de Managua.

Tabla 4: Vector geográfico

N°.	Vector	Código	Nombre de Región	Departamentos
1	R1	PS	Pacífico Sur	Masaya, Granada, Carazo, Rivas
2	R2	PN	Pacífico Norte	León, Chinandega, Managua
3	R3	CN	Central Norte	Nueva Segovia, Madriz, Estelí, Jinotega, Matagalpa, Boaco, Chontales
4	R4	AS	Atlántico Sur	Región Autónoma del Caribe Sur (RACS), Río San Juan
5	R5	AN	Atlántico Norte	Región Autónoma del Caribe Norte (RACN)

Fuente: Anuario de aforos de tráfico del 2020, MTI, página 7.

Para la elección de los factores de ajuste se identificó cual es la estación de Corta Duración o Conteo Sumaria más cercana a la estación de conteo y su correspondiente estación de mayor cobertura a la cual pertenece.

Desde el punto de vista Geográfico, la estación más cercana al tramo en estudio es la Estación de Corta Duración N° 215, tramo: Hotel Nejapa - Km.10 1/2 (NIC-2B), la cual corresponde a la Estación de Mayor Cobertura N° 200 Entrada al INCAE – El Crucero.

Tabla 5: Dependencia de estaciones

ESTACION DE MAYOR COBERTURA	NIC	Nº ESTACION	TIPO	NOMBRE DEL TRAMO
200 Entrada al INCAE - El Crucero	NIC-1	108	ECD	Emp. San Isidro - La Trinidad
	NIC-1	112	ECD	Emp. Yalagüina - Somoto
	NIC-2B	215	ECD	Hotel Nejapa - Km.10 1/2 Carretera Sur (Ida)
	NIC-2	209	ECD	Km. 10 1/2 Carretera Sur - Entrada al INCAE
	NIC-2	202	ECD	El Crucero - Cuatro Esquinas
	NIC-2	203	ECD	Cuatro Esquinas - Diriamba
	NIC-2	204	ECD	Diriamba - Jinotepe
	NIC-4	404	ECD	Granada - Emp. Guanacaste
	NIC-4B	433	ECD	Rtda.Coyotepe - Rtda. Tisma - Rtda. Las Flores
	NIC-8	801	ECD	Emp. Las Conchitas - El Salto
	NIC-8	802	ECD	El Salto - San Rafael del Sur

Fuente: Anuario de aforo de tráfico del 2020, Anexos, MTI, página 34.

Considerando el porcentaje vehicular de la estación de conteo la cual dio como resultado un 87.22% de vehículos livianos y 8.95% de vehículos pesados, se comprobó que tiene similitud con los de la estación de mayor cobertura N° 200 debido a que posee un 87.3% de vehículos livianos Y un 12.6% de vehículos pesados.

Tabla 6: Porcentaje vehicular de Estaciones de Mayor Cobertura

Nº	EST.	NOMBRE DEL TRAMO	TPDA	Total Pesados	Σ Tx-Sx y Cx-Rx	% de Livianos	% de Pesados	% Tx-Sx y Cx-Rx Vehículos de Carga
1	101B	Zona Franca - La Garita	24,523	5,291	956	78.3%	21.6%	18.1%
2	1205	Emp. Chichigalpa - Rotonda Chinandega	10,585	2,614	934	75.0%	24.7%	35.70%
3	200	Entrada al INCAE - El Crucero	9,403	1,183	283	87.3%	12.6%	23.90%
4	1802	San Marcos - Masatepe	9,392	830	69	91.1%	8.8%	8.30%
5	401	Masaya - Granada	8,882	1,074	69	87.8%	12.1%	6.40%
6	107	Sébaco - Emp. San Isidro	7,877	1,797	463	77.0%	22.8%	25.8%
7	300	Sébaco - Quebrada Honda	6,270	1,459	200	76.5%	23.3%	13.70%
8	2803	Nagarote - La Paz Centro	6,058	2,227	1106	62.8%	36.8%	49.70%
9	2404	Chinandega - Corinto	5,471	1,754	1,110	67.7%	32.1%	63.30%
10	2400	Chinandega (Rotonda) - Ranchería	4,019	686	166	81.1%	17.1%	24.20%
11	700	Emp. San Francisco - Tecolostote	2,024	638	96	68.3%	31.5%	15.0%

Fuente: Anuario de aforo de tráfico del 2020, MTI, página 13.

De tal manera que los factores de ajuste que se utilizarán son los pertenecientes a la Estación de Mayor Cobertura (EMC) N° 200 denominada: Entrada al INCAE – El Crucero a como lo indica el anuario.

Debido a que el conteo se realizó durante el mes de Julio se utilizará lo factores de ajuste del segundo cuatrimestre.

Tabla 7: Factores de expansión del segundo cuatrimestre (Mayo – Agosto) de la Estación de Mayor Cobertura N° 200, Entrada al INCAE – El crucero

Descripción	Moto	Carro	Jeep	Camioneta	Micro Bus	Mini Bus	Bus	Liv. 2-5 t.	C2	C3	Tx- Sx<=4	Tx- Sx=>5	Cx- Rx=<4	Cx- Rx=>5	V.A	V.C	Otros
Factor Día	1,27	1,31	1,23	1,27	1,23	1,20	1,21	1,29	1,30	1,37	1,00	1,49	1,00	1,00	1,00	1,00	1,23
Factor Semana	0,96	1,03	1,03	0,97	0,96	0,88	0,95	0,89	0,86	0,84	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	0,97
Factor Fin de Semana	1,11	0,94	0,94	1,09	1,11	1,54	1,15	1,43	1,72	1,95	1,00	1,01	1,00	1,00	1,00	1,00	1,10
Factor Expansión a TPDA	1,00	0,93	0,92	0,92	0,92	1,05	1,00	0,96	0,94	0,96	1,00	0,82	1,00	1,00	1,00	1,00	0,73

Fuente: Anuario de aforo de tráfico del 2020, MTI, página 324.

De esta manera, al multiplicar TPD_i por cada factor se obtendrá el Tránsito Promedio Diario Anual cuya ecuación se describe a continuación:

$$TPDA = TPD_i * Factor\ D\acute{a} * Factor\ Semana * Factor\ Fin\ de\ Semana * Factor\ de\ Expansi\acute{o}n \quad (Ec. 7)$$

Como no se realizó un conteo de fin de semana, el factor fin de semana no será utilizado en el cálculo de TPDA, por tanto la ecuación se reduce a la siguiente expresión:

$$TPDA = TPD_i * Factor\ D\acute{a} * Factor\ Semana * Factor\ de\ Expansi\acute{o}n \quad (Ecuaci\acute{o}n\ 8)$$

Como ejemplo se realizará el cálculo de TPDA para las Motos, dando como resultado:

$$TPDA = 236\ vehiculos/dia * 1.27 * 0.96 * 1 = 288\ vehiculos/dia$$

De igual manera se realizarán los cálculos para el resto de tipos de vehículos.

Seguidamente se presenta el resultado conseguido de la proyección del TPD_i a TPDA:

Tabla 8: Tránsito Promedio Diario Anual TPDA₂₀₂₁ por tipo de vehículo en ambos sentidos

	Motos	Vehículos de Pasajeros						Vehículos de Carga				Equipo Pesado	TOTAL (VPD)
		Autos	Jeep	Camionetas	McBus <15 s.	MnBus 15-30 s.	Bus 30+ s.	Liv. 2-5 t	C2 5 + t	C3	T3 - S2	Otros	
TPDi	236	109	25	85	14	4	2	25	20	2	1	21	544
FACTOR DIA	1.27	1.31	1.23	1.27	1.23	1.2	1.21	1.29	1.3	1.37	1.49	1.23	
FACTOR SEMANA	0.96	1.03	1.03	0.97	0.96	0.88	0.95	0.89	0.86	0.84	1	0.97	
FCATOR EXPANSIÓN A TPDA	1	0.93	0.92	0.92	0.92	1.05	1	0.96	0.94	0.96	0.82	0.73	
TPDA	288	137	30	97	16	5	3	28	22	3	2	19	650
% TRÁNSITO	44.31%	21.08%	4.62%	14.92%	2.46%	0.77%	0.46%	4.31%	3.38%	0.46%	0.31%	2.92%	100.0%
88.15%							8.92%						
% VEHICULOS LIVIANOS							% VEHICULOS PESADOS						

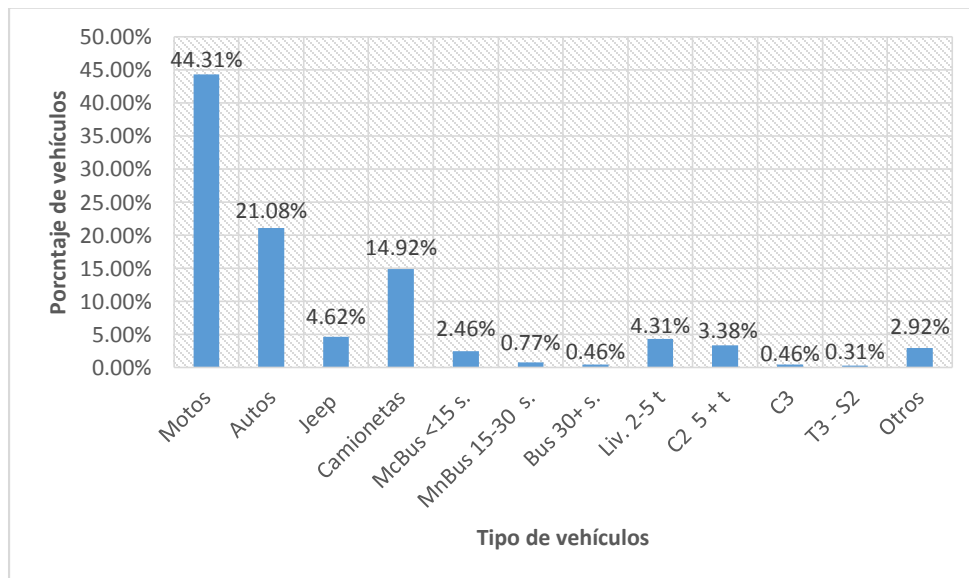
Fuente: Elaboración Propia

De los resultados obtenidos del TPDA se observa que el 88.96% de los vehículos que circulan por el camino son de pasajeros, sobresaliendo las motos que son las de mayor porcentaje con 45.05%, otro que tiene un porcentaje alto son los autos con un 21.45%.

En el caso de los de los vehículos pesados representan un 8.22% de TPDA, encontrándose mayormente el camión ligero con un porcentaje de 4.21%, seguido de los camiones tipo C2 con un valor porcentual del 3.30%

En la gráfica siguiente se muestran los porcentajes de los distintos tipos de vehículos que circulan por el camino:

Grafica 1: Porcentaje por tipo de vehículos que componen el TPDA₂₀₂₁



Fuente: Elaboración Propia

2.6 Pronóstico de volúmenes de tránsitos

El tránsito futuro se compone del valor proyectado del tránsito a partir del año en que se espera sea concluida la ejecución del proyecto. Para efectos de normalizar los términos se ha dividido en los siguientes componentes:

- Tránsito Normal
- Tránsito Generado
- Tránsito Atraído

Tránsito Normal (TN): es el resultante del crecimiento esperado del tránsito en la vía existente, aunque no se lleve a cabo un proyecto. Es calculado aplicándose las tasas de crecimiento, obtenidas a través del análisis por métodos estadísticos del tránsito del pasado.

Tránsito Generado (TG): es el tránsito consecuente de las facilidades creadas por la construcción o mejoramiento de una carretera, sin los cuales no sería originado. Este es producto del desarrollo socioeconómico y de la aparición de nuevos servicios que se presenta a lo largo de vía.

Tránsito Atraído (TD): es el resultante del crecimiento esperado del tránsito, desviado de otras carreteras u otros medios de transporte (tránsito atraído), a la carretera proyectada (nueva o mejorada) en virtud de un menor costo de transporte.

En la página 27 se puede ver la justificación del tránsito del atraído y tránsito generado.

2.7 Tasas de crecimiento de variables relacionadas al tránsito

Las variables macroeconómicas que se relacionan al transporte son: el Producto Interno Bruto (PIB), consumo de combustible, crecimiento poblacional y Tránsito Promedio Diario Anual de la Estación de Mayor Cobertura y de Corta Duración. Estas serán analizadas a través de los registros de años anteriores de cada una de las variables mencionadas.

Los registros se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 9: Registro histórico de las variables relacionadas al tránsito

Año	PIB (Millones de C\$ constantes)	Consumo Nacional de Combustible (Miles de Barriles)	TPDA EMC N° 200	TPDA ECD N° 215	Población Ciudad Sandino
2006	118,837.70	4,702.63	5,912	8,739	78643
2007	124,870.30	5,221.63	6,041	9,889	80799
2008	129,160.50	4,858.80	5,856		82997
2009	124,907.70	4,997.87	6,379	8,640	84664
2010	130,416.30	5,167.90	6,412	9,074	86,903
2011	138,654.20	5,390.10	6,435	-	99,268
2012	147,661.40	5,579.74	6,862	9,329	101,929
2013	154,936.80	5,788.15	6,892	9,782	104,447
2014	162,351.30	6,124.31	7,783	-	107,018
2015	170,131.60	6,812.08	8,685	-	109,644
2016	177,894.90	7,287	9,466	9,229	112,324
2017	186,133.60	7,576.30	10,089	-	115,061
2018	178,780.60	7,061.14	8,918	-	117,855
2019	171,845.90	7,267.18	9,825	-	120,705

Fuente: Anuario de Estadísticas Macroeconómicas del Banco Central de Nicaragua, edición 2021; Ministerio de Energía y Minas, Anuario Estadístico de Hidrocarburos, edición 2019; Anuario de Aforos de Tráfico, MTI, edición 2020.

Para este proceso se utilizará un el método descrito en la página 14 del anuario de aforos de tráfico de año 2020 emitido por el MTI, el cual brinda una ecuación para determinar tasas de crecimiento. Esta ecuación es:

$$TC = \left[\left(\frac{TPDA_i}{TPDA_0} \right)^{1/n} \right] - 1 \quad (\text{Ecuación 9})$$

Donde:

TC = tasa de crecimiento.

TPDA_i = Tráfico Promedio Diario Actual.

TPDA₀ = Tráfico Promedio Diario Actual del año base.

n = La diferencia de años.

Ejemplo de cálculo para el PIB:

TPDA₂₀₀₇ = Tráfico Promedio Diario Actual = 124,870.30

TPDA₂₀₀₆ = Tráfico Promedio Diario Actual del año base = 118,837.70

n = La diferencia de años = 1.

Utilizando la ecuación se obtiene:

$$TC = \left[\left(\frac{124,870.30}{118,837.70} \right)^{1/1} \right] - 1 = 5.08 \%$$

TPDA₂₀₀₈ = Tráfico Promedio Diario Actual = 129,160.5

TPDA₂₀₀₆ = Tráfico Promedio Diario Actual del año base = 118,837.70

n = La diferencia de años = 2.

Utilizando la ecuación se obtiene:

$$TC = \left[\left(\frac{129,160.5}{118,837.70} \right)^{1/2} \right] - 1 = 4.25 \%$$

De esta manera se realiza el cálculo para cada de las tasa de crecimiento para el PIB y las de más variables relacionadas al tráfico.

En la tabla siguiente se muestran los valores de las variables de tránsito:

Tabla 10: Tasa de crecimiento de las variables relacionadas al tránsito

Año	PIB	Consumo Nacional de Combustible	TPDA N° 200	TPDA N° 215	Población Ciudad Sandino
2007	5.08	11.04	2.18	13.16	2.74
2008	4.25	1.65	-0.47		2.73
2009	1.67	2.05	2.57	-0.38	2.49
2010	2.35	2.39	2.05	0.94	2.53
2011	3.13	2.77	1.71		4.77
2012	3.69	2.89	2.51	1.09	4.42
2013	3.86	3.01	2.22	1.62	4.14
2014	3.98	3.36	3.50		3.93
2015	4.07	4.20	4.37		3.76
2016	4.12	4.48	4.82	0.55	3.63
2017	4.16	4.43	4.98		3.52
2018	3.51	3.45	3.49		3.43
2019	2.93	3.40	3.98		3.35
PROMEDIO	3.60	3.78	2.92	2.83	3.49

Fuente: Elaboración Propia

2.7.1 Determinación de tasas de crecimiento

Dado que anteriormente se ha determinado la tasa de crecimiento de las variables ligadas al tránsito como el PIB, consumo de combustible, crecimiento poblacional, Estación de Mayor Cobertura y la Estación de Corta Duración cercanas al tramo de camino en estudio, se ocupará para el Tránsito Normal (TN) el promedio de las tasas de crecimiento.

Es importante mencionar que, debido a que la estación de corta duración N° 215 tuvo una tasa de 2.83%, este será omitido en el cálculo ya que al no contar con un registro completo el valor conseguido no es muy exacto.

En la tabla siguiente se muestra el promedio la tasa de tránsito normal:

Tabla 11: Tasa de crecimiento del Tránsito Normal

Variable	Tasa de crecimiento	Tasa de crecimiento promedio
PIB	3.60%	3.45%
Consumo de Combustible	3.78%	
TPDA EMC N° 200	2.92%	
Crecimiento Poblacional de Ciudad Sandino	3.49%	

Fuente: Elaboración Propia

Para el Tránsito Atraído (TA), su crecimiento será nulo ya que independientemente de la creación de la nueva carretera no habrá aumento en la cantidad de vehículos debido a que no existen carreteras aledañas que puedan desviar parte de su volumen vehicular por esta vía, ni tampoco influirá en el cambio del medio de transporte, es decir, que no se cambiará el uso de taxis, buces, microbuses, etc., por vehículos particulares por el simple hecho de la existencia de la nueva carretera.

En el caso del Tránsito Generado (TG), Cal y Mayor (2018) sugiere que “la experiencia indica que en carreteras construidas con altas especificaciones, el suelo lateral tiende a desarrollarse más rápidamente de lo normal, generando un tránsito adicional el cual se considera como tránsito desarrollado, con valores del orden del 5% del tránsito actual” (p. 220), por lo tanto este será el porcentaje utilizado. Este porcentaje se aplicará dos años después de poner en funcionamiento la carretera.

Tabla 12: Tasa de crecimiento del Tránsito Generado

Variable	Tasa de crecimiento
Tránsito Generado, Cal y Mayor	5%

Fuente: Elaboración Propia

Ya definidas las tasa de crecimiento se procederá al pronóstico del tránsito futuro que será igual al TPDA total que circulará por la vía durante su periodo de diseño.

La tasa de crecimiento anual final del tráfico que se utilizará para calcular de factor de crecimiento anual en el cálculo de repeticiones esperadas será igual a la tasa del tránsito normal.

Tabla 13: Tasa de crecimiento anual final del tránsito

Variable	Tasa de crecimiento final
Tasa de crecimiento del Tránsito Normal	3.45%

Fuente: Elaboración Propia

2.8 Proyección de tránsito futuro

El tránsito futuro será igual al Tránsito Promedio Diario Anual Total (TPDA Total) que circulara por la vía y está definido por la siguiente ecuación:

$$TPDA_T = TN + TG + TA \quad (\text{Ecuación 10})$$

Donde:

TPDA_T = Tránsito Promedio Diario Anual Total.

TN = Tránsito Normal.

TG = Tránsito Generado.

TA = Tránsito de Atraído.

El **Tránsito Actual** será igual al TPDA₂₀₂₁ que circula por la vía, calculado en la tabla 8, página 21.

Tabla 14: Resumen del Tránsito Actual en ambos sentidos

	Motos	Vehículos de Pasajeros						Vehículos de Carga				Equipo Pesado	TOTAL (VPD)
		Autos	Jeep	Cam.	McBus <15 s.	MnBus 15-30 s.	Bus 30+ s.	Liv. 2-5 t	C2 5 + t	C3	T3 - S2	Otros	
TPDA ₂₀₂₁	288	137	30	97	16	5	3	28	22	3	2	19	650

Fuente: Elaboración Propia

El **Tránsito Normal**, es el resultante del crecimiento esperado del tránsito en la vía existente y este será igual al acumulativo del tránsito actual más un porcentaje de vehículos calculado en base al tránsito actual por medio de la tasa de crecimiento calculada en la tabla 11, página 27.

Este valor estará definido por la ecuación:

$$TN = To (1 + i)^n \quad (\text{Ecuación 11})$$

TN = Tránsito Normal.

To = Tráfico actual o en año base.

i = Tasa de crecimiento.

n = Año para el cual se calcula el volumen de tráfico.

A continuación se presenta el cálculo del tránsito normal para las motos en el año 2022:

$$TN_{2022} = 288 \text{ VPD} (1 + 0.0345)^1 = 298 \text{ VPD}$$

De la misma manera se calculó para los demás tipos de vehículos.

Tabla 15: Proyección del Tránsito Normal

DATOS	TRÁNSITO BASE																		
	2021	288	137	30	97	16	5	3	28	22	3	0	2	0	0	0	0	19	650
	TASA DE CRECIMIENTO NORMAL PROMEDIO DEL TRÁNSITO																		
	3.45%																		
N°	Año	Motos	Vehiculos de Pasajeros						Vehiculos de Carga						Equipo Pesado			TOTAL (VPD)	
			Autos	Jeep	Camionetas	McBus <15 s.	MnBus 15-30 s.	Bus 30+ s.	Liv. 2-5 t	C2 5 + t	C3	T2 - S2	T3 - S2	C2 - R2	C3 - R2	V.A.	V.C		Otros
0	2021	288	137	30	97	16	5	3	28	22	3	0	2	0	0	0	0	19	650
1	2022	298	142	32	101	17	6	4	29	23	4	0	3	0	0	0	0	20	679
2	2023	309	147	33	104	18	6	4	30	24	4	0	3	0	0	0	0	21	703
3	2024	319	152	34	108	18	6	4	31	25	4	0	3	0	0	0	0	22	726
4	2025	330	157	35	112	19	6	4	33	26	4	0	3	0	0	0	0	22	751
5	2026	342	163	36	115	19	6	4	34	27	4	0	3	0	0	0	0	23	776
6	2027	353	168	37	119	20	7	4	35	27	4	0	3	0	0	0	0	24	801
7	2028	366	174	39	123	21	7	4	36	28	4	0	3	0	0	0	0	25	830
8	2029	378	180	40	128	21	7	4	37	29	4	0	3	0	0	0	0	25	856
9	2030	391	186	41	132	22	7	5	38	30	5	0	3	0	0	0	0	26	886
10	2031	405	193	43	137	23	8	5	40	31	5	0	3	0	0	0	0	27	920
11	2032	419	199	44	141	24	8	5	41	32	5	0	3	0	0	0	0	28	949
12	2033	433	206	46	146	25	8	5	43	34	5	0	4	0	0	0	0	29	984
13	2034	448	213	47	151	25	8	5	44	35	5	0	4	0	0	0	0	30	1015
14	2035	463	221	49	156	26	9	5	46	36	5	0	4	0	0	0	0	31	1051
15	2036	479	228	50	162	27	9	5	47	37	5	0	4	0	0	0	0	32	1085
16	2037	496	236	52	167	28	9	6	49	38	6	0	4	0	0	0	0	33	1124
17	2038	513	244	54	173	29	9	6	50	40	6	0	4	0	0	0	0	34	1162
18	2039	531	253	56	179	30	10	6	52	41	6	0	4	0	0	0	0	35	1203
19	2040	549	261	58	185	31	10	6	54	42	6	0	4	0	0	0	0	37	1243
20	2041	568	270	60	192	32	10	6	56	44	6	0	4	0	0	0	0	38	1286

Fuente: Elaboración Propia

El **Tránsito Generado** es el resultante de las mejoras en el suelo adyacente a la carretera y se obtiene en base al tránsito normal a lo largo del periodo de diseño de la vía a través de la tasa de crecimiento definida en la tabla 12, página 28. Cabe destacar que este tipo de tránsito se presenta dos años después de que la carretera fue puesta al servicio, es decir, en el año 2024. Este valor estará definido por la ecuación:

$$TG = Ta * i_G \quad (\text{Ecuación 12})$$

TG = Tránsito Generado.

Ta = Tránsito del año que se desea calcular.

i_G = Tasa de crecimiento del tránsito generado.

A continuación se presenta el cálculo del tránsito generado para las motos en el año 2024:

$$TG_{2024} = 319 \text{ VPD} * 0.05 = 16 \text{ VPD}$$

De la misma manera se calculó para los demás tipos de vehículos.

Tabla 16: Proyección del Tránsito Generado

DATOS	TASA DE CRECIMIENTO DEL TRÁNSITO GENERADO																		
	5.00%																		
N°	Año	Motos	Vehiculos de Pasajeros						Vehiculos de Carga						Equipo Pesado			TOTAL (VPD)	
			Autos	Jeep	Camionetas	McBus <15 s.	MnBus 15-30 s.	Bus 30+ s.	Liv. 2-5 t	C2 5 + t	C3	T2 - S2	T3 - S2	C2 - R2	C3 - R2	V.A.	V.C		Otros
0	2021																		
1	2022																		
2	2023																		
3	2024	16	8	2	6	1	1	1	2	2	1	0	1	0	0	0	0	2	37
4	2025	17	8	2	6	1	1	1	2	2	1	0	1	0	0	0	0	2	44
5	2026	18	9	2	6	1	1	1	2	2	1	0	1	0	0	0	0	2	46
6	2027	18	9	2	6	1	1	1	2	2	1	0	1	0	0	0	0	2	46
7	2028	19	9	2	7	2	1	1	2	2	1	0	1	0	0	0	0	2	49
8	2029	19	9	2	7	2	1	1	2	2	1	0	1	0	0	0	0	2	49
9	2030	20	10	3	7	2	1	1	2	2	1	0	1	0	0	0	0	2	52
10	2031	21	10	3	7	2	1	1	2	2	1	0	1	0	0	0	0	2	53
11	2032	21	10	3	8	2	1	1	3	2	1	0	1	0	0	0	0	2	55
12	2033	22	11	3	8	2	1	1	3	2	1	0	1	0	0	0	0	2	57
13	2034	23	11	3	8	2	1	1	3	2	1	0	1	0	0	0	0	2	58
14	2035	24	12	3	8	2	1	1	3	2	1	0	1	0	0	0	0	2	60
15	2036	24	12	3	9	2	1	1	3	2	1	0	1	0	0	0	0	2	61
16	2037	25	12	3	9	2	1	1	3	2	1	0	1	0	0	0	0	2	62
17	2038	26	13	3	9	2	1	1	3	2	1	0	1	0	0	0	0	2	64
18	2039	27	13	3	9	2	1	1	3	3	1	0	1	0	0	0	0	2	66
19	2040	28	14	3	10	2	1	1	3	3	1	0	1	0	0	0	0	2	69
20	2041	29	14	3	10	2	1	1	3	3	1	0	1	0	0	0	0	2	70

Fuente: Elaboración Propia

El **Tránsito Promedio Diario Anual Total (TPDA Total)** será igual a la suma del Tránsito Normal más el Tránsito Generado.

Este valor estará definido por la ecuación:

$$TPDA_T = \text{Tránsito Normal} + \text{Tránsito Generado} \quad (\text{Ecuación 13})$$

A continuación se presenta el cálculo del tránsito generado para las motos en el año 2024:

$$TPDA_T = 319 \text{ VPD} + 16 \text{ VPD} = 335 \text{ VPD}$$

De la misma manera se calculó para los demás tipos de vehículos.

Tabla 17: Proyección de TPDA total

Nº	Año	Motos	Vehiculos de Pasajeros						Vehiculos de Carga							Equipo Pesado			TOTAL (VPD)
			Autos	Jeep	Camionetas	McBus <15 s.	MnBus 15-30 s.	Bus 30+ s.	Liv. 2-5 t	C2 5 + t	C3	T2 - S2	T3 - S2	C2 - R2	C3 - R2	V.A.	V.C	Otros	
0	2021	288	137	30	97	16	5	3	28	22	3	0	2	0	0	0	0	19	650
1	2022	298	142	32	101	17	6	4	29	23	4	0	3	0	0	0	0	20	679
2	2023	309	147	33	104	18	6	4	30	24	4	0	3	0	0	0	0	21	703
3	2024	335	160	36	114	19	7	5	33	27	5	0	4	0	0	0	0	24	763
4	2025	347	165	37	118	20	7	5	35	28	5	0	4	0	0	0	0	24	795
5	2026	360	172	38	121	20	7	5	36	29	5	0	4	0	0	0	0	25	822
6	2027	371	177	39	125	21	8	5	37	29	5	0	4	0	0	0	0	26	847
7	2028	385	183	41	130	23	8	5	38	30	5	0	4	0	0	0	0	27	879
8	2029	397	189	42	135	23	8	5	39	31	5	0	4	0	0	0	0	27	905
9	2030	411	196	44	139	24	8	6	40	32	6	0	4	0	0	0	0	28	938
10	2031	426	203	46	144	25	9	6	42	33	6	0	4	0	0	0	0	29	973
11	2032	440	209	47	149	26	9	6	44	34	6	0	4	0	0	0	0	30	1004
12	2033	455	217	49	154	27	9	6	46	36	6	0	5	0	0	0	0	31	1041
13	2034	471	224	50	159	27	9	6	47	37	6	0	5	0	0	0	0	32	1073
14	2035	487	233	52	164	28	10	6	49	38	6	0	5	0	0	0	0	33	1111
15	2036	503	240	53	171	29	10	6	50	39	6	0	5	0	0	0	0	34	1146
16	2037	521	248	55	176	30	10	7	52	40	7	0	5	0	0	0	0	35	1186
17	2038	539	257	57	182	31	10	7	53	42	7	0	5	0	0	0	0	36	1226
18	2039	558	266	59	188	32	11	7	55	44	7	0	5	0	0	0	0	37	1269
19	2040	577	275	61	195	33	11	7	57	45	7	0	5	0	0	0	0	39	1312
20	2041	597	284	63	202	34	11	7	59	47	7	0	5	0	0	0	0	40	1356

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla 17 podemos observar que el TPDA₂₀₄₁ proyectado es igual a 1,356 vehículos por día y este dato nos permite definir la clasificación funcional de la carretera. Según las normas del “Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las carreteras Regionales” se obtiene el siguiente resultado:

Tabla 18: Clasificación funcional de las carreteras

No.	DESCRIPCION	AUTOPISTAS REGIONALES	TRONCALES			COLECTORAS		
			Suburbanas	Rurales		Suburbanas	Rurales	
1	TPDA, vehículos promedio diario	>20,000	20,000-10,000	10,000-3,000		3,000-500	3,000-500	
2	VHD, vehículos por hora	>2,000	2,000-1,000	1,500-450		300-50	450-75	
3	Factor de Hora Pico, FHP	0.92	0.92	0.95-0.91		0.92	0.85	
4	Vehículo de Diseño	WB-20	WB-20	WB-20		WB-15	WB15	
5	Tipo de Terreno	P O M	P O M	P O M		P O M	P O M	
6	Velocidad de Diseño o Directriz, km/hora	110 90 70	90 80 70	80 70 60		70 60 50	70 60 50	
7	Número de Carriles	4 a 8	2 a 4	2 a 4		2	2	
8	Ancho de Carril, metros	3.6	3.6	3.6		3.3-3.6	3.3	
9	Ancho de Hombros/Espaldones, metros	Int: 1.0 - 1.5 Ext: 1.8 - 2.5	Int: 1.0 - 1.5 Ext: 1.8 - 2.5	Int: 0.5 - 1.0 Ext: 1.2 - 1.8		Ext: 1.2 - 1.5	Ext: 1.2 - 1.5	
10	Tipo de Superficie de Rodamiento	Pav.	Pav.	Pav.		Pav.	Pav.-Grava	
11	Dist.de Visibilidad de Parada, metros	110-245	110-170	85-140		65-110	65-110	
12	Dist. de Visib. Adelantamiento, metros	480-670	480-600	410-540		350-480	350-480	
13	Radio Min. de Curva, Peralte 6%, metros	195-560	195-335	135-250		90-195	90-195	
14	Maximo Grado de Curva	5°53' - 2°03'	5°53' - 3°25'	8°29' - 4°35'		12°44' - 5°53'	12°44' - 5°53'	
15	Pendiente Longitudinal Max, porcentaje	6	8	8		10	10	
16	Sobreelevación, porcentaje	10	10	10		10	10	
17	Pendiente Transversal de Calzada, %	1.5 - 3	1.5-3	1.5-3		1.5-3	1.5-3	
18	Pendiente de Hombros, porcentaje	2-5	2-5	2-5		2-5	2-5	
19	Ancho de Puentes entre bordillos, metros	Variable	Variable	Variable		7.8-8.7	7.8-8.1	
20	Carga de Diseño de Puentes (AASHTO)	HS 20-44+25%	HS20-44+25%	HS20-44+25%		HS20-44	HS20-44	
21	Ancho de Derecho de vía, metros	80-90	40-50	40-50		20-30	20-30	
22	Ancho de Mediana, metros	4-12	4-10	2-6		-	-	
23	Nivel de Servicio, según el HCM	B-C	C-D	C-D		C-D	C-D	
24	Tipo de Control de Acceso	Control Total	Control Parcial	Sin Control		Sin Control	Sin Control	
25	CLASIFICACION FUNCIONAL	AR-TS	AR-TS-TR	TR-CR		TS-CS	TR-CR	

Notas: Pav: Pavimento asfáltico o de cemento Portland

P: Plano O: Ondulado M: Montañoso

AR:Autopista Regional, TS: Troncal Suburbana, TR: Troncal Rural, CS: Colectora Suburbana, CR: Colectora Rural

Fuente: Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las carreteras Regionales, SIECA 2ª Edición, 2004, página 13.

La carretera se clasifica como una Colectora Rural (CR) ya que el TPDA se encuentra comprendido entre 500 y 3,000 vehículos por día y no existen viviendas a lo largo de la trayectoria de vía.

El periodo de diseño de una carretera clasificada como Colectora Rural según el manual de diseño de pavimentos, SIECA 2002 es el siguiente:

Tabla 19: Periodo de diseño por tipo de carretera

Tipo de Carretera	Período de Diseño
Autopista Regional	20 – 40 años
Troncales suburbanas	15 – 30 años
Troncales Rurales	
Colectoras Suburbanas	10 – 20 años
Colectoras Rurales	

Fuente: Manual Centroamericano para el Diseño de Pavimento, SIECA 2002, Capítulo 7, página 3.

2.9 Repeticiones esperadas

Toda la información referente al tráfico termina siendo empleada para conocer el número de repeticiones esperadas, durante todo el periodo de diseño, de cada tipo de eje. Para poder conocer estos valores tendremos que conocer varios factores referentes al tránsito, como es el tránsito Promedio Diario Anual (TPDA), el % que representa cada tipo de eje en el TPDA, el factor de crecimiento del tráfico, el factor sentido, el factor carril y el periodo de diseño.

El manual de diseño y construcción de pavimentos de la Cemex, expresa que las repeticiones esperadas se definen como:

$$Re = TPDA * \%Te * FS * FC * Pd * FCA * 365 \quad (\text{Ecuación 14})$$

Donde:

TPDA = Tránsito Promedio Diario Anual.

%Te = % del TPDA para cada tipo de eje.

FS = Factor de Sentido.

FC = Factor de Carril.

Pd = Periodo de Diseño.

FCA = Factor de Crecimiento Anual.

365 = días de un año.

2.9.1 Tránsito Promedio Diario Anual (TPDA)

El TPDA puede obtenerse de aforos especializados. Lo importante es que se especifique la composición de este tráfico, es decir, que se detalle el tráfico por tipo de vehículo, para que de esta manera se pueda identificar los tipos y pesos de los ejes que van a circular sobre el pavimento.

El método de diseño de la PCA recomienda considerar únicamente el tráfico pesado, es decir, que se desprece todo el tráfico ligero como automóviles y pick-ups de 4 llantas. De cualquier modo, no es tan importante hacer caso a esta recomendación, debido a que el tráfico ligero no influye demasiado en el diseño de espesores.

2.9.2 Factor Sentido (FS)

El Manual Centroamericano de Diseño de pavimento (SIECA, Capítulo 3, pag.28), establece que el factor total del flujo censado, en la mayoría de los casos este valor es de 0.5; ya que la mitad de los vehículos va en una dirección y la otra mitad en la otra dirección.

Puede darse el caso de ser mayor en una dirección que en la otra, lo que puede deducirse del conteo de tránsito efectuado.

Por lo tanto, considerando lo anteriormente expuesto se determinó los porcentajes de distribución por sentido los cuales se presentan en la tabla 2, página12 de este documento dando como resultado los valores:

- Para el sentido Cuajachillo # 1 - Nejapa es igual a 51.30%.
- Para el sentido Nejapa – Cuajachillo # 1 es igual a 48.70%.

Se puede observar que la distribución de los vehículos es aproximadamente igual por lo que se tomará el valor de **factor sentido igual a 0.5**.

2.9.3 Factor Carril (FC)

Este factor se define como el carril de diseño aquel que recibe el mayor número de ESAL's. Para caminos de dos carriles, cualquiera de los dos puede ser el carril de diseño, ya que el tránsito por dirección forzosamente se canaliza por ese carril.

Tabla 20: Factor Carril

Número de carriles en una sola dirección	LC ¹¹
1	1.00
2	0.80 – 1.00
3	0.60 – 0.80
4	0.50 – 0.75

Fuente: Manual Centroamericano para el Diseño de Pavimento, SIECA 2002, Capítulo 3, página 29.

De esta manera se tomará el valor del **factor carril igual a 1** debido a que la vía posee un solo carril en una sola dirección.

2.9.4 Periodo de Diseño

Según la Portland Cement Association (PCA) en su libro “**Diseño de Espesores para Pavimento de Hormigón**” (capítulo 2, página 8) menciona que, debido a que el tráfico puede no ser predicho con mucha precisión para un periodo largo, comúnmente se utiliza un periodo de diseño de 20 años en procedimientos de diseño de pavimentos.

Existen casos en donde periodos más cortos o más largos pueden ser justificados económicamente, tales casos pueden ser una carretera de transporte especial que será usada sólo por pocos años, o una construcción muy cara donde se desea tener un alto nivel de servicio por un periodo largo, con escaso o sin mantenimiento.

Como no se considera ninguno de los casos anteriores, se utilizará un **periodo de diseño igual a 20 años**.

2.9.5 Factor de Crecimiento Anual (FCA)

El factor de crecimiento anual se calculará de la siguiente manera:

$$FCA = \frac{(1+g)^n - 1}{(g)(n)} \quad (\text{Ecuación 15})$$

Donde:

FC = Factor de Crecimiento Anual

n = vida útil en años = 20 años

g = tasa de crecimiento anual final = 3.45%

$$FCA = \frac{(1+0.0345)^{20} - 1}{(0.0345)(20)} = 1.407$$

2.9.4 Cálculo de Repeticiones Esperadas

Se calculará el número de repeticiones esperadas para cada tipo de vehículo que circula en la vía durante el periodo de diseño.

Se tendrán en cuenta las consideraciones mencionadas a continuación:

- El TPDA utilizado se muestra en la tabla 8, página 21 de este documento.
- El %Te se considerará del igual a 1, estimando que todos los vehículos circularán totalmente cargados que sería la situación más crítica.
- FS = 0.5.
- FC = 1.
- Pd = 20 años.
- FCA = 1.407.

A continuación se presenta la tabla con los cálculos de repetidores esperadas de cada tipo de vehículo:

Tabla 21: Repeticiones esperadas por tipo de vehículos

Tipo de Vehículo	TPDA ₂₀₂₁	%Te	FS	FC	Pd	FCA	Días del Año	Repeticiones Esperadas
Autos	137	1	0.5	1	20	1.407	365	703,571
Jeep	30	1	0.5	1	20	1.407	365	154,067
Camionetas	97	1	0.5	1	20	1.407	365	498,149
McBus (< 15 s)	16	1	0.5	1	20	1.407	365	82,169
MnBus (15 - 30 s)	45	1	0.5	1	20	1.407	365	25,678
Bus (30+ s)	3	1	0.5	1	20	1.407	365	15,407
Liv. (2-5 t)	28	1	0.5	1	20	1.407	365	143,796
C2 (5+ t)	22	1	0.5	1	20	1.407	365	112,983
C3	3	1	0.5	1	20	1.407	365	15,407
T3S2	2	1	0.5	1	20	1.407	365	10,272
Repeticiones Totales								1,761,499

Fuente: Elaboración Propia

Los valores obtenidos muestran el total de repeticiones esperadas para cada uno de los vehículos que circularán por la vía y a la que estará sometida la estructura de pavimento durante 20 años, es decir, durante el periodo de diseño. La suma total de fue de 1,761,499 de repeticiones esperadas.

En Anexos, tablas 58 y 59, páginas IV y V, se encuentran los pesos de ejes de los distintos vehículos considerados en el cálculo presentado en la tabla 22.

Tabla 22: Repeticiones esperadas por tipo de eje y peso

Tipo de Vehículo	Tipo de ejes	Peso en Kips	Repeticiones por Vehículo	Repeticiones por eje
Autos	Sencillo	2.2	703,571	703,571
	Sencillo	2.2		703,571
Jeep	Sencillo	2.2	154,067	154,067
	Sencillo	2.2		154,067
Camionetas	Sencillo	2.2	498,149	498,149
	Sencillo	4.4		498,149
Microbús (< 15 Persona)	Sencillo	4.4	82,169	82,169
	Sencillo	8.8		82,169
Minibús (15 - 30 personas)	Sencillo	8.8	25,678	25,678
	Sencillo	17.6		25,678
BUS (30+ s)	Sencillo	11	15,407	15,407
	Sencillo	22		15,407
Liv. (2-5 t)	Sencillo	8.8	143,796	143,796
	Sencillo	17.6		143,796
C2 (5+ t)	Sencillo	11	112,983	112,983
	Sencillo	22		112,983
C3	Sencillo	11	15,407	15,407
	Tándem	36.3		15,407
T3-S2	Sencillo	11	10,272	10,272
	Tándem	35.2		10,272
	Tándem	35.2		10,272
Repeticiones Totales			1,761,499	3,533,270

Fuente: Elaboración Propia

En la tabla se muestran la separación de las repeticiones esperadas para cada tipo de eje; esto es, para cada peso de eje y para cada tipo; ejes sencillos y tándem.

Tabla 23: Sumatoria y agrupación de las repeticiones esperadas por peso y tipo de eje

Tipo de eje	Peso en Kips	Total repeticiones
Sencillo	2.2	2,213,425
	4.4	580,318
	8.8	251,643
	11	154,069
	17.6	169,474
	22	128,390
Tándem	35.2	20,544
	36.3	15,407
Total de repeticiones		3,533,270

Fuente: Elaboración Propia

Se puede observar que para los diferentes tipos de ejes (sencillos y tándem) y peso por eje, se determinó el total de repeticiones esperadas a la que estará sometida la estructura de pavimento, las cuales servirán para determinar el porcentaje de fatiga y de erosión.

CAPÍTULO III. ESTUDIO DE SUELOS



3.1 Introducción

Los estudios de suelo forman una parte fundamental del diseño de pavimentos en la actualidad, esto se debe a que permite conocer las propiedades físicas y mecánicas de los diferentes estratos de suelos que se encuentran en la trayectoria de la vía que se está diseñando.

Además, los estudios de suelo permiten determinar un perfil estratigráfico en el cual se detallen los distintos tipos de suelos y su profundidad.

El objetivo de estos estudios es la obtención de una subrasante que sea capaz de cumplir con las especificaciones técnicas mínimas para ser utilizada.

Según el Manual Centroamericano para Diseño de pavimento (SIECA, Capítulo 4, pag.2), dice que “la subrasante es definida como el suelo preparado y compactado para soportar la estructura de un sistema de pavimento”.

Para este objetivo, es necesario practicar ensayos de laboratorio a las muestras de suelos con el fin de determinar sus características entre las cuales están: granulometría, clasificación, límites de Atterberg (límite líquido e índice plástico), valor de soporte (CBR), densidad y humedad.

3.2 Trabajos de campo

Las tareas de campo comprenden la exploración del subsuelo a lo largo de la vía y en las áreas de fuentes de materiales las cuales se describen a continuación:

3.2.1 A lo largo del trazado de la vía

En la vía se realizó un total de cinco sondeos manuales con espaciamiento de 250 metros con una profundidad de 1.5 metros.

3.2.2 En las áreas de fuentes de materiales

Debido a que la fuente de material a utilizar será el banco Miraflores que actualmente está en explotación, se tomaron muestras del material existente.

3.3 Sondeos manuales

Los sondeos se realizaron a la izquierda y derecha a lo largo de longitud del camino con el fin de obtener muestras alternas de los distintos estratos de suelos. También se procedió a la exploración del banco de material, siendo todas estas muestras clasificadas por su color y tipo de material.

Estas fueron previamente identificadas con su ubicación, profundidad y número de sondeo, para luego ser almacenadas en bolsas y trasladadas al laboratorio de suelo ubicado en UNI-RUPAP.

3.4 Trabajos de laboratorio

Los ensayos de laboratorio correspondientes al estudio de suelos, se realizarán conforme a los Normas AASHTO o ASTM y serán los siguientes:

Tabla 24: Ensayes para sondeos efectuados a lo largo del trazado de la vía

Tipo de Ensaye	Designación	
	AASHTO	ASTM
Análisis Granulométrico de los Suelos	T-88	D-422
Límite líquido de los Suelos	T-89	D-423
Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos	T-90	D-424
Clasificación Highway Research Board, o clasificación AASHTO	M-145	D-3282
Humedad Natural		D-2216
CBR (California Bearing Ratio)	T-193	D-1883

Fuente: Manual para la Revisión de Estudios Geotécnicos, MTI, 2008, sección 2.4.

Tabla 25: Ensayes para muestras provenientes de las fuentes de materiales

Tipo de Ensaye	Designación	
	AASHTO	ASTM
Análisis Granulométrico de los Suelos	T-88	D-422
Límite líquido de los Suelos	T-89	D-423
Límite Plástico e Índice de Plasticidad de los Suelos	T-90	D-424
Clasificación Highway Research Board, o clasificación AASHTO	M-145	D-3282
Humedad Natural		D-2216
CBR (California Bearing Ratio)	T-193	D-1883
Pesos Volumétricos		C-29
Desgaste Los Ángeles en muestras de materiales para Base	T-104	C-131

Fuente: Manual para la Revisión de Estudios Geotécnicos, MTI, 2008, sección 2.4.

Se deberá agregar el siguiente ensayo:

Tabla 26: Ensayo para muestras provenientes de la vía y fuente de material

Tipo de ensaye	Designación	
	AASHTO	ASTM
Proctor Estándar	T-99	D-698
Proctor Modificado	T-1557	D-180

Fuente: Elaboración propia

El ensaye proctor estándar será aplicado a los sondeos manuales obtenidos de la línea y el proctor modificado al material de banco, estos se realizarán con el objetivo de conocer la densidad seca máxima y la humedad óptima.

3.5 Resultado de los trabajo de laboratorio

3.5.1 A lo largo del trazado de la vía

Una vez realizado las distintas pruebas a las muestras de suelo, se determinaros los siguientes valores:

3.5.1.1 Humedad natural

La humedad natural está definida como la relación existente entre el peso del agua y el peso de las partículas sólidas de una muestra de suelo, expresado en porcentaje.

Se determinó el contenido de humedad de los distintos estratos de suelos encontrados cuyos resultados se presentan en anexo, tabla 60, página VI. Cabe destacar que, en ninguno de los estacionamientos donde se realizaron los sondeos se encontró nivel de agua freático (NAF).

3.5.1.2 Granulometría

El análisis granulométrico tiene por objetivo determinar el tamaño de las partículas o granos que constituyen un suelo y fijar, en porcentaje de su peso total, la cantidad de granos de distintos tamaños que el mismo contiene.

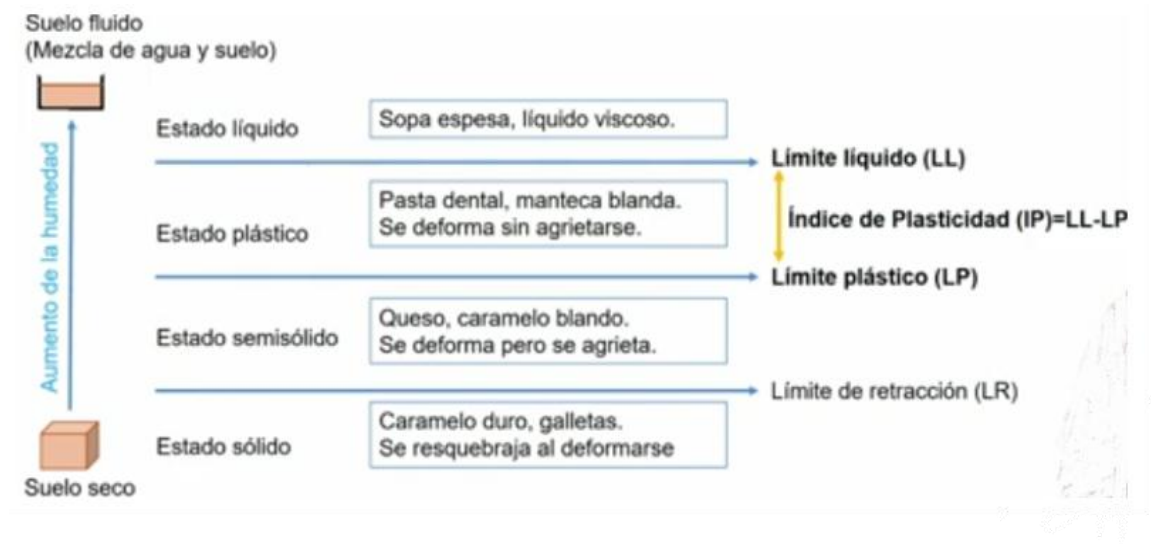
Este tipo de análisis permite clasificar el suelo por los métodos Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS), norma A.S.T.M, designación D 2487 y Clasificación de Suelos y Mezclas de Agregados de Suelos para Propósitos de Construcción de Carreteras, norma A.S.T.M, designación D 3282, siendo este último el utilizado en este trabajo de investigación.

Los resultados obtenidos del análisis granulométrico se presentan en anexo, tabla 60, página VI.

3.5.1.3 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg permiten definir el contenido de agua con el cual se produce el cambio de estado, es decir, miden la consistencia o plasticidad del suelo fino. Estos límites son:

Imagen 3: Límites de Atterberg o de consistencia de suelos



Fuente: Canal Universitat Politècnica de València – UPV. (29 de octubre de 2019). Límites de atterberg: limite líquido y limite plástico grafico de plasticidad de Casagrande [Archivo de Video]. Youtube. https://youtu.be/VRp_nQKVeOk

Límite líquido: se define como el porcentaje de humedad con respecto al peso seco de la muestra, con el cual el suelo cambia del estado líquido al plástico.

Límite plástico: es el porcentaje de humedad, con respecto al peso seco de la muestra secada al horno, para la cual los suelos cohesivos pasan de un estado semilíquido a un estado plástico.

Índice de plasticidad: El rango de contenido de agua sobre el cual un suelo se compara plásticamente. Numéricamente, es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico.

Los resultados conseguidos en este ensayo se pueden ver en anexo, tabla 60, página VI.

3.5.1.4 Clasificación de los suelos

Los suelos encontrados en la línea según la Clasificación de Suelos y Mezclas de Agregados de Suelos para Propósitos de Construcción de Carreteras, norma ASTM D-3282, se clasifican como: A-1-b (0), A-2-4 (0) y A-6 (2), cuya descripción

es arena con grava, arena limosa y limo arcillo arenoso respectivamente. Es importante señalar que la mayoría de los suelos encontrados son materiales granulares.

En anexo, imagen 11, página X, se presenta el perfil estratigráfico de los sondeos realizados, con la clasificación correspondiente (H.R.B.) de cada una de las capas encontradas indicando su espesor.

A continuación se presenta los resultados obtenidos según la clasificación de los suelos:

Tabla 27: Resumen de los suelos encontrados a lo largo de la vía

Tipo de suelo	Clasificación H.R.B.	Estacionamiento (m)	Profundidad (cm)
Materiales Granulares	A-1-b (0)	0+250	80 – 150
		1+000	0 – 150
	A-2-4 (0)	0+000	0 – 150
		0+250	40 – 80
		0+500	0 – 100
		0+750	0 – 150
Materiales Limo - arcilla	A-6 (2)	0+250	0 – 40
		0+500	100 – 150

Fuente: Elaboración Propia

Los grupos de suelos se definieron de la siguiente manera:

Tabla 28: Grupos de suelos según su clasificación

Estacionamiento (m)	# de Sondeos Realizados	# Grupo	Clasificación H.R.B.	Frecuencia
0+000 a 0+500	3	1	A-2-4 (0)	2
		2	A-6 (2)	1
0+500 a 1+000	2	3	A-2-4 (0)	1

Fuente: Elaboración Propia

3.5.1.5 Compactación de suelo (Proctor Estándar)

Se denomina compactación de suelos al proceso mecánico por el cual se busca mejorar las características de resistencia, compresibilidad y esfuerzo deformación de los mismos. Este proceso implica una reducción más o menos rápida de los vacíos, como consecuencia de la cual en el suelo ocurren cambios de volúmenes de importancia, fundamentalmente ligados a pérdida de volumen de aire. La compactación está relacionada con la densidad máxima o peso volumétrico seco máximo del suelo que para producirse es necesario que la masa del suelo tenga una humedad determinada que se conoce como humedad óptima.

Los beneficios de una buena compactación son:

- Aumenta la capacidad para soportar cargas.
- Impide el hundimiento del suelo.
- Reduce el escurrimiento del agua.
- Reduce el esponjamiento y la contracción del suelo.
- Impide los daños en las heladas.

El método proctor estándar consiste en compactar una muestra de suelo colocado en tres capas aplicando 25 golpes por cada capa dejando caer un martillo de compactación de 2.5 kg de una altura de 30 cm en un molde utilizando distintos contenidos de humedad, los que sean necesarios para crear una curva de compactación y así determinar la densidad seca máxima y una humedad óptima.

Se determinó la densidad seca máxima y humedad óptima de los suelos con clasificación A-2-4 (0) y A-6 (2) debido a que son los suelos más representativos a lo largo del camino en estudio y los de menor calidad encontrados a profundidades menores de 60 cm. De los ensayos se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 29: Resultados de ensayo proctor estándar para suelo con clasificación A-2-4 (0), estación 0+000 m

Tipo de ensayo	Estándar	Método de ensayo	D-698
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD			
Ensayo N°	1	2	3
Molde N°	M1		
Altura del molde (cm)	11.64		
Diámetro interior del molde (cm)	10.16		
N° de capas	3	3	3
N° de golpes por capas	25	25	25
Peso del molde + peso suelo compactado (gr)	5854	6017	6029
Peso del molde vacío (gr)	4273	4273	4273
Peso suelo compactado (gr)	1581	1744	1756
Volumen del molde (cm³)	943.3	943.3	943.3
Densidad Húmeda (kg/m³)	1676.03	1848.83	1861.55
Densidad Seca (kg/m³)	1467.23	1520.71	1459.05
DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD			
Prueba N°	1	2	3
Tara N°	A-120	E-YO	K-30
Peso de la tara + suelo húmedo (gr)	76.9	76.5	82.5
Peso de la tara + suelo seco (gr)	73.2	71.3	73.7
Peso de la tara (gr)	47.2	47.2	41.8
Peso suelo seco (gr)	26	24.1	31.9
Contenido de Humedad (%)	14.23	21.58	27.59
Densidad Seca Máxima (Kg/m³)			
1521.77			
Humedad Óptima (%)			
20.68			

Fuente: Elaboración Propia

Ejemplo de cálculo para el ensayo numero 1:

Cálculos para determinar la humedad

$$\text{Peso suelo seco} = (\text{Peso de tara} + \text{suelo seco}) - (\text{Peso tara}) \quad (\text{Ecuación 16})$$

$$\text{Peso suelo seco} = 73.2 - 47.2 = 26 \text{ gr}$$

$$\% \text{ de humedad} = \frac{(\text{Peso de tara+suelo húmedo})-(\text{Peso suelo seco})-(\text{Peso tara})}{\text{Peso suelo seco}} * 100 \quad (\text{Ecuación 17})$$

$$\% \text{ de humedad} = \frac{76.9 - 26 - 47.2}{26} = 14.23 \%$$

Cálculos para determinar la densidad

$$\text{Peso suelo compactado} = (\text{Peso molde} + \text{suelo compactado}) - (\text{Peso molde vacío})$$

$$\text{Peso suelo compactado} = 5854 - 4273 = 1581 \text{ gr}$$

$$\text{Densidad Humeda } (\gamma_h) = \frac{\text{Peso suelo compactado}}{\text{Volumen del molde}} \quad (\text{Ecuación 18})$$

Factor de conversión

$$\text{gr}/\text{cm}^3 \rightarrow \text{kg}/\text{m}^3 = 1 \frac{\text{gr}}{\text{cm}^3} * \frac{1 \text{ kg}}{1000 \text{ gr}} * \frac{100^3}{1 \text{ m}^3} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, \text{ El valor se multiplicará por el factor 1000.}$$

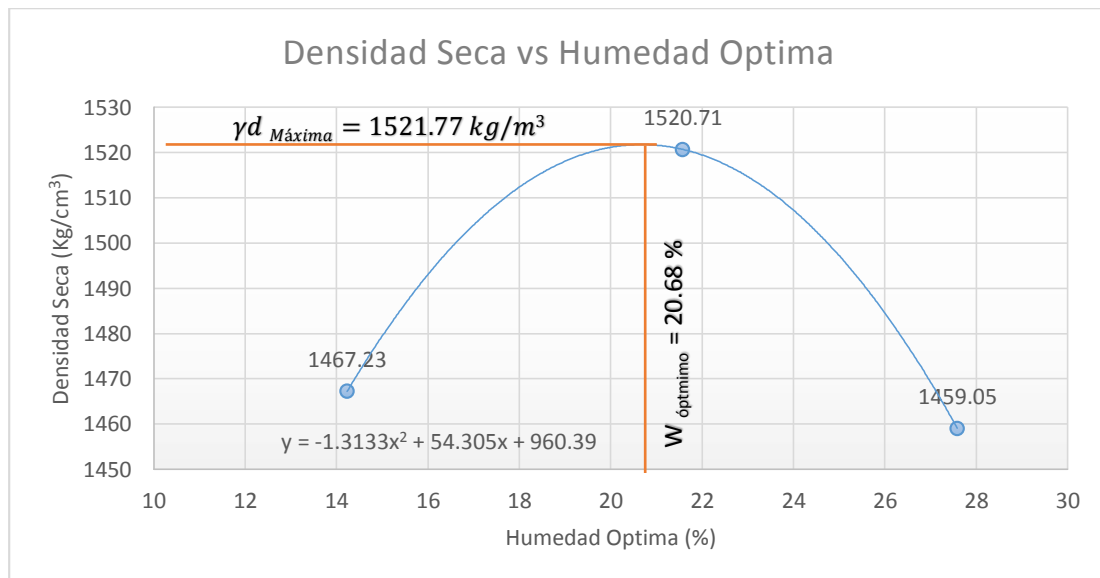
$$\text{Densidad Humeda } (\gamma_h) = \frac{1581}{943.3} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 1676.03 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$$\text{Densidad Seca } (\gamma_d) = \frac{\text{Densidad humeda } (\gamma_h)}{1 + \frac{\% \text{ de humedad}}{100}} \quad (\text{Ecuación 19})$$

$$\text{Densidad Seca } (\gamma_d) = \frac{1676.03 \text{ kg}/\text{m}^3}{1 + \frac{14.23}{100}} = 1467.23 \text{ kg}/\text{m}^3$$

De igual manera se determinó estos valores para el resto de ensayos.

Gráfica 2: Densidad máxima seca vs Humedad óptima del suelo A-2-4 (0), estación 0+000 m



Fuente: Elaboración Propia

Según los resultados obtenidos los suelos tipo A-2-4 (0) en la estación 0+000 m alcanzan una densidad máxima seca de 1521.77 Kg/m³ y una humedad óptima de 20.68%.

Procedimiento para calcular la humedad optima y densidad seca máxima

Debido a que la ecuación es una función cuadrática la humedad óptima se puede determinar con la siguiente ecuación:

$$W_{opt} = \frac{-b}{2a} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Donde los valores a, b, c son:

$$y = -1.3133x^2 + 54.305x + 960.39$$

$$a = -1.3133$$

$$b = 54.305$$

$$c = 960.39$$

Por lo tanto:

$$W_{\text{óptima}} = \frac{-b}{2a} = \frac{-54.305}{2(-1.3133)} = 20.68\%$$

Al introducir este valor en la ecuación se obtiene la densidad seca.

$$y = -1.3133(20.68)^2 + 54.305(20.68) + 960.39 = 1,521.77 \text{ kg/m}^3$$

De igual manera se determina la densidad máxima seca y humedad óptima para las demás muestras ensayadas.

Tabla 30: Resultados de ensayo proctor estándar para suelo con clasificación A-2-4 (0), estación 0+500 m

Tipo de ensayo	Estándar	Método de ensayo		D-698
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD				
Ensayo N°		1	2	3
Molde N°		M2		
Altura del molde (cm)		11.64		
Diámetro interior del molde (cm)		10.16		
N° de capas		3	3	3
N° de golpes por capas		25	25	25
Peso del molde + peso suelo compactado (gr)		5807.5	5948.8	5991.1
Peso del molde vacío (gr)		4269.7	4269.7	4269.7
Peso suelo compactado (gr)		1537.8	1679.1	1721.4
Volumen del molde (cm³)		943.3	943.3	943.3
Densidad Húmeda (kg/m³)		1630.23	1780.03	1824.87
Densidad Seca (kg/m3)		1471.09	1509.64	1461.67
DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD				
Prueba N°		2	3	4
Tara N°		TC-2	OO21	I-P
Peso de la tara + suelo húmedo (gr)		74.2	96.6	113.7
Peso de la tara + suelo seco (gr)		70.1	88.2	97.3
Peso de la tara (gr)		32.2	41.3	31.3
Peso suelo seco (gr)		37.9	46.9	66
Contenido de Humedad (%)		10.82	17.91	24.85

Densidad Seca Máxima
(Kg/m³)

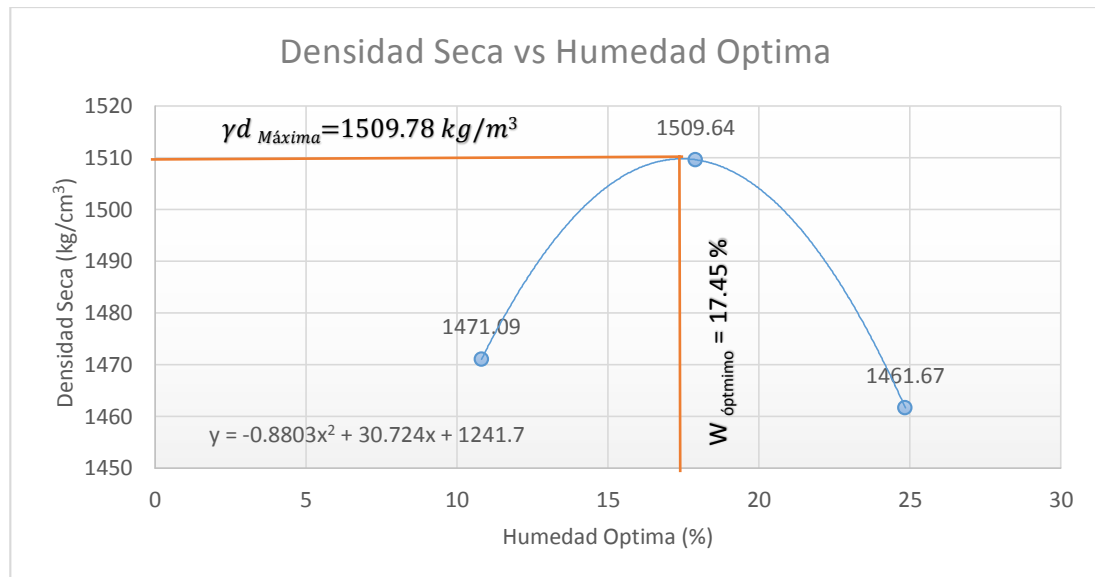
1509.78

Humedad Óptima (%)

17.45

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 3: Densidad máxima seca vs Humedad óptima del suelo A-2-4 (0), estación 0+500 m



Fuente: Elaboración Propia

Según los resultados obtenidos, los suelos tipo A-2-4 (0) en la estación 0+500 m alcanzan una densidad máxima seca de 1509.78 Kg/m³ y una humedad óptima de 17.45%.

Tabla 31: Datos de ensayo proctor estándar para suelo con clasificación A-6 (2), estación 0+500 m

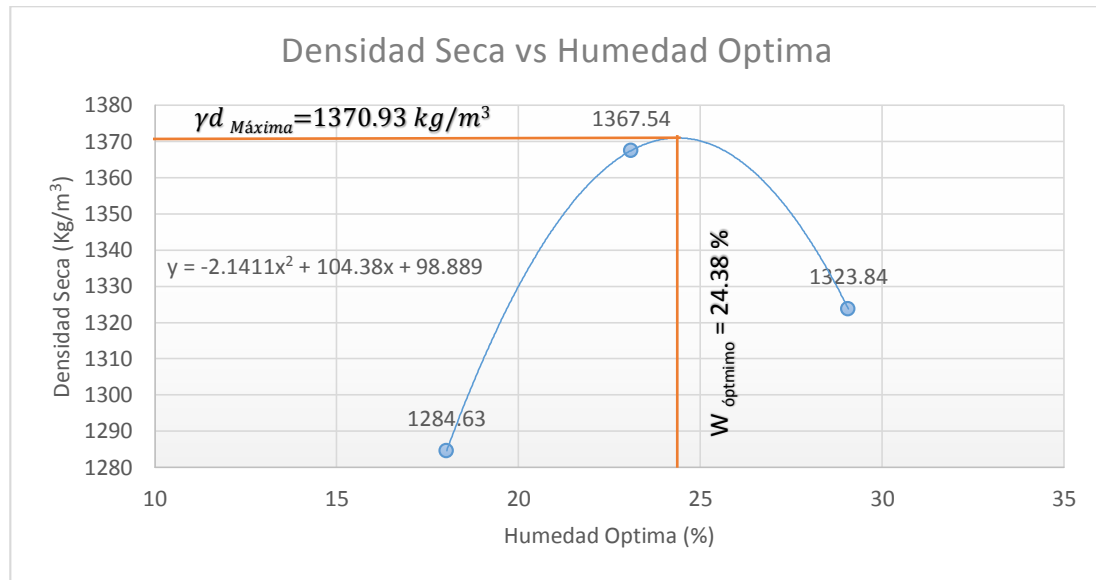
Tipo de ensayo	Estándar	Método de ensayo	D-698
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD			
Ensayo N°	1	2	3
Molde N°	M2		
Altura del molde (cm)	11.64		
Diámetro interior del molde (cm)	10.16		
N° de capas	3	3	3
N° de golpes por capas	25	25	25
Peso del molde + peso suelo compactado (gr)	5699.9	5857.7	5881.5
Peso del molde vacío (gr)	4269.7	4269.7	4269.7
Peso suelo compactado (gr)	1430.2	1588	1611.8
Volumen del molde (cm ³)	943.3	943.3	943.3
Densidad Húmeda (kg/m ³)	1516.17	1683.45	1708.68
Densidad Seca (kg/m ³)	1284.63	1367.54	1323.84
DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD			
Prueba N°	2	3	4
Tara N°	T-1	A-120	PI-03
Peso de la tara + suelo húmedo (gr)	69.2	87.5	81.6
Peso de la tara + suelo seco (gr)	63	79.9	74.1
Peso de la tara (gr)	28.6	47	48.3
Peso suelo seco (gr)	34.4	32.9	25.8
Contenido de Humedad (%)	18.02	23.10	29.07

Densidad Seca Máxima
(kg/m³)
1370.93

Humedad Óptima (%)
24.38

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 4: Densidad máxima seca vs Humedad óptima del suelo A-6 (2)



Fuente: Elaboración Propia

Según los resultados obtenidos los suelos tipo A-6 (2) alcanzan una densidad máxima seca de 1370.93 Kg/m³ y una humedad óptima de 24.38%.

3.5.1.6 Relación de soporte de California (C.B.R.)

Este método de prueba se utiliza para evaluar la resistencia potencial del material de la subrasante, la subbase y la capa base, incluyendo materiales reciclados para su uso en carreteras.

En este ensayo se mide la carga necesaria para hacer penetrar un pistón de 50±5 mm de diámetro en una masa de suelo compactada en un molde cilíndrico de acero, a una velocidad de 1,27 mm/min, para producir deformaciones de hasta 12,7 mm (1/2"). Esta carga se relaciona con una carga estándar y el resultado final se expresa en porcentaje. La curva de comparación se llama curva patrón y corresponde a un agregado normalizado al cual se le asigna un valor CBR de 100%.

La expresión que define al CBR, es la siguiente:

$$CBR = \frac{\text{Fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5 mm en un suelo}}{\text{Fuerza necesaria para producir una penetración de 2.5 mm en la muestra patrón}} * 100 \quad (\text{Ecuación 21})$$

De la ecuación se puede ver que el número CBR, es un porcentaje de la carga unitaria patrón. En la práctica el símbolo de (%) se quita y la relación se presenta simplemente por el número entero.

Los valores de la carga unitaria patrón que deben utilizarse en la ecuación 17 son los siguientes:

Tabla 32: Valores de esfuerzo unitario patrón

PENETRACIÓN			CARGA UNITARIA PATRÓN		
Milímetros (mm)	Centímetros (cm)	Pulgadas (pulg)	Kilogramos/cm ² (kg/cm ²)	Mpa	PSI
2.5	0.25	0.10	70.31	6.9	1000
5.0	0.50	0.20	105.46	10.3	1500
7.5	0.75	0.30	133.58	13.0	1900
10.0	1.00	0.40	161.71	16.0	2300
12.7	1.27	0.50	182.8	18.0	2600

Fuente: Guía de Mecánica de Suelos I, UNI, 2019, página 104.

Otro cálculo a tener en cuenta en este ensayo es el porcentaje de hinchamiento del espécimen.

El hinchamiento es el aumento porcentual de la altura referido a la altura inicial, que experimenta una probeta de suelo cuando la humedad de la misma aumenta, por inmersión, desde la humedad inicial de compactación hasta la alcanzada por la probeta al término del periodo de inmersión.

El hinchamiento se calcula por la diferencia ente las lecturas del deformímetros antes y después de la inmersión. Este valor se refiere en tanto por ciento con respecto a la altura de la muestra en el molde. Su ecuación es:

$$\% \text{ de hinchamiento} = \frac{(L_f - L_i)}{H} * 100 \quad (\text{Ecuación 22})$$

Donde:

Lf: Lectura final de la altura del espécimen en el deformímetro después de sumergirse.

Li: Lectura inicial de la altura del espécimen en el deformímetro antes de sumergirse.

H: Altura del espécimen antes de la prueba.

Se determinó los valores de C.B.R. y de hinchamiento para los suelos A-2-4 (0) y A-6 (2), utilizando tres especímenes compactados cada uno de ellos con diferente energía de compactación, dando 10, 25 y 56 golpes. Luego se sometieron a un tiempo de saturación de 96 horas antes de realizar el ensayo.

En anexos, Tablas 61, 62 y 63, páginas VII, VIII y IX se encuentran detallados los datos de ensayo para ambos tipos de suelos. A continuación se presentan un resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 33: Resumen de la prueba de C.B.R. para suelo A-2-4 (0), estación 0+000 m.

PROYECTO: Diseño de pavimento rígido.						
CAMINO: Cuajachillo # 1 - Nejapa.						
ENSAYE No. 1						
MUESTRA No. 1						
FUENTE DE MATERIAL: De la línea del camino.						
ANÁLISIS GRANULOMETRICO DE MATERIAL						
TAMIZ	3/4"	3/8"	4	10	40	200
% QUE PASA	100	99	98	73	37	21
LÍMITE LÍQUIDO: 35						
ÍNDICE DE PLASTICIDAD: 7						
CLASIFICACIÓN H.R.B: A-2-4 (0)						
EQUIVALENTE DE ARENA: -----						
TIPO DE PRUEBA EMPLEADA: Proctor Estándar						
PESO VOLUM. SECO MÁXIMO: 1521.77 Kg/m ³						
HUMEDAD ÓPTIMA: 20.68 %						
PRUEBAS DE C.B.R. SATURADA						
MÉTODO DE COMPACTACIÓN EMPLEADO: Proctor Estándar						
PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN	90	95	100			
PESO VOLUM. SECO (Kg/m ³)	1340.5	1440.1	1524.7			
C.B.R. SATURADO (%)	8.5	16.8	25.1			
HINCHAMIENTO (%)	0.18	0.27	0.24			
TIEMPO DE SATURACIÓN (horas)	96	96	96			

Fuente: Elaboración Propia

Ejemplo de cálculo de C.B.R. para material A-2-4 (0), estación 0+000 m compactado al 90%, 95% y 100%:

Cálculos para determinar la humedad

$$\% \text{ de humedad} = \frac{\text{Peso (humedo+tara)} - \text{Peso (seco+tara)}}{\text{Peso (seco+tara)} - \text{Peso (tara)}} * 100 \quad (\text{Ecuación 23})$$

$$\% \text{ de humedad} = \frac{165.6 - 146.6}{146.6 - 48.4} = 19.35 \%$$

Cálculos para determinar la densidad

$$\text{Densidad Humeda } (\gamma_h) = \frac{\text{Peso (mat.humedo+molde)} - \text{Peso molde}}{\text{Volumen del molde}} \quad (\text{Ecuación 24})$$

Se multiplicará por el factor de conversión 1000.

$$\text{Densidad Humeda } (\gamma_h) = \frac{10509 \text{ gr} - 7112 \text{ gr}}{2123 \text{ cm}^3} * 1000 = 1600 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Densidad Seca } (\gamma_d) = \frac{\text{Densidad humeda } (\gamma_h)}{1 + \frac{\% \text{ de humedad}}{100}} \quad (\text{Ecuación 25})$$

$$\text{Densidad Seca } (\gamma_d) = \frac{1600 \text{ kg/m}^3}{1 + \frac{19.35}{100}} = 1340.5 \text{ kg/m}^3$$

Cálculo del porcentaje de compactación reproducida

Esta se determina dividiendo el peso volumétrico seco determinado en el ensayo de C.B.R. entre la densidad seca máxima obtenida del ensayo proctor estándar realizado a la muestra. Su ecuación es:

$$\% \text{ de Compactación Reproducida} = \frac{\text{Peso Volumetrico Seco del ensayo C.B.R.}}{\text{Densidad Seca Maxima } (\gamma_{\max}) \text{ del ensayo proctor estandar}} * 100 \quad (\text{Ec. 26})$$

$$\% \text{ de Compactación Reproducida} = \frac{1340.5 \text{ kg/m}^3}{1521.77 \text{ kg/m}^3} * 100 = 88.1\%$$

Se toma las lecturas para las penetraciones de 2.54 mm (0.1") y 5.08 mm (0.2") para realizar el cálculo de C.B.R. tomando el mayor de ellos. La lectura será afectada por un factor de lectura el cual es definido por la máquina y posteriormente dividida por el área del pistón de penetración para calcular el

esfuerzo. Dicho valor es dividido por el valor de esfuerzo unitario patrón para finalmente ser multiplicado por 100.

Para la lectura de 2.54 mm (0.1")

$$Esfuerzo (PSI) = \frac{Lectura\ 2.54\ mm\ (0.1") * Factor\ de\ lectura}{Area\ del\ pistón\ de\ carga} \quad (Ecuación\ 27)$$

$$Esfuerzo (PSI) = \frac{3.1 * 52.95\ lb}{3\ pulg^2} = 54.72$$

$$C.B.R. = \frac{Esfuerzo}{Esfuerzo\ unitario\ patrón\ para\ 0.1"} * 100 \quad (Ecuación\ 28)$$

$$C.B.R. = \frac{54.72\ PSI}{1000\ PSI} * 100 = 5.472 \approx 5.5$$

Para la lectura de 5.08 mm (0.2")

$$Esfuerzo (PSI) = \frac{Lectura\ 5.08\ mm\ (0.2") * Factor\ de\ lectura}{Area\ del\ pistón\ de\ carga} \quad (Ecuación\ 29)$$

$$Esfuerzo (PSI) = \frac{5.8 * 52.95\ lb}{3\ pulg^2} = 102.37$$

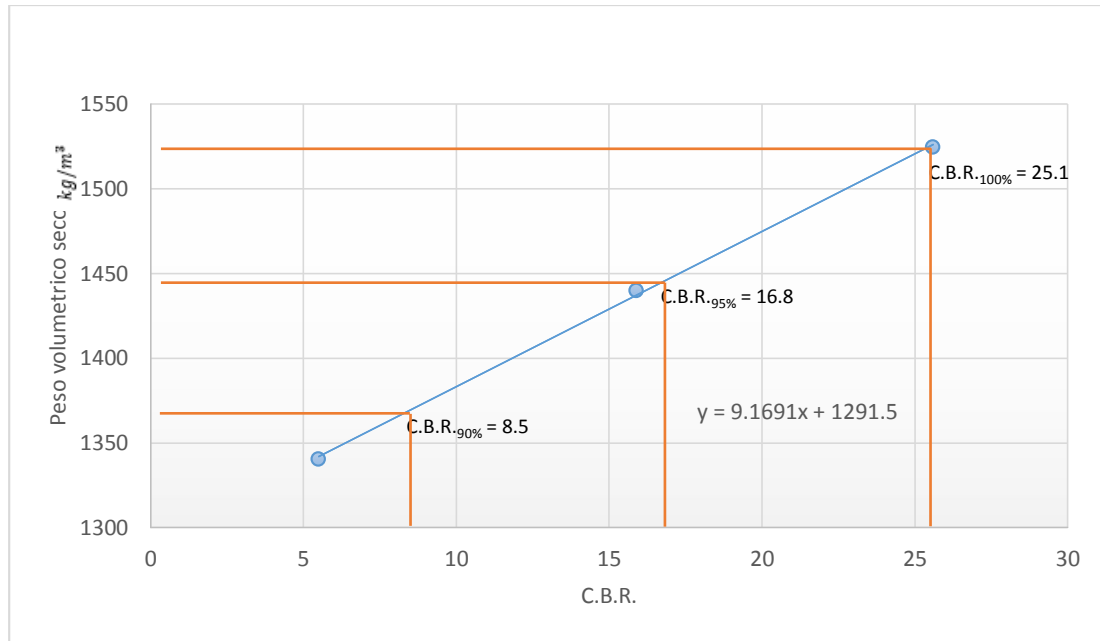
$$C.B.R. = \frac{Esfuerzo}{Esfuerzo\ unitario\ patrón\ para\ 0.2"} * 100 \quad (Ecuación\ 30)$$

$$C.B.R. = \frac{102.37\ PSI}{1500\ PSI} * 100 = 6.82 \approx 6.8$$

En este caso, se toman los valores de 2.54 mm (0.1") ya que resultaron valores de C.B.R. mayores que los obtenidos en 5.08 mm (0.2"). Ver anexo, tabla 61, página VII.

Se grafica el peso volumétrico seco vs el C.B.R. obtenidos para los tres especímenes compactados, con el fin de obtener una ecuación y que se presenta a continuación:

Gráfica 5: Peso Volumétrico Seco vs C.B.R. para suelo A-2-4 (0), estación 0+000 m



Fuente: Elaboración Propia

Se realizó el cálculo para obtener el C.B.R. al 90% de compactación, utilizando el peso volumétrico se máximo calculado del ensayo proctor estándar dando como resultado el siguiente valor:

$$\gamma d_{90\%} = \gamma d_{Máxima} * 0.9 \quad (\text{Ecuación 31})$$

$$\gamma d_{90\%} = 1521.77 \text{ kg/m}^3 * 0.9 = 1369.59 \text{ kg/m}^3$$

Al igualar la ecuación obtenida del gráfico al peso volumétrico seco al 90% y despejando "X", se obtiene el siguiente resultado:

$$1369.59 = 9.1691X + 1291.5$$

$$X = \frac{1369.59 - 1291.5}{9.1691} = 8.5$$

El C.B.R. al 90% del proctor estándar es igual al 8.5%. De igual manera se determinaron los valores para el 95% y 100% de compactación dando como resultado 16.8% y 25.1% respectivamente.

Ejemplo de cálculo de hinchamiento para material A-2-4 (0), estación 0+000 m compactado con 10 golpes por capa:

Tabla 34: Datos de la prueba de hinchamiento

Altura del molde (mm)	177.80
Altura del disco espaciador (mm)	61.37
Lectura inicial de la altura del espécimen en el deformímetro antes de sumergirse (Li)	10
Lectura final de la altura del espécimen en el deformímetro después de sumergirse (Lf)	31
Factor hinchamiento (mm)	0.01

Fuente: Elaboración Propia

Procedimiento:

Altura del espécimen antes de la prueba (H)

$$H = \text{Altura del molde} - \text{Altura del disco espaciador} \quad (\text{Ecuación 32})$$

$$H = 177.80 - 61.37 = 116.43 \text{ mm}$$

La diferencia de la lectura inicial y final del deformímetro se multiplicará por un factor de corrección definido por el aparato utilizado en la medición.

$$\% \text{ de hinchamiento} = \frac{(Lf - Li) * \text{Factor de hinchamiento}}{H} * 100 \quad (\text{Ecuación 33})$$

$$\% \text{ de hinchamiento} = \frac{(31 - 10) * 0.01 \text{ mm}}{116.43 \text{ mm}} * 100 = 0.18 \%$$

De la misma manera se realiza el cálculo de hinchamiento para el 95% y 100% de compactación.

Tabla 35: Resumen de la prueba de C.B.R. para suelo A-2-4 (0), estación 0+500 m.

PROYECTO: Diseño de pavimento rígido.						
CAMINO: Cuajachillo # 1 - Nejapa.						
ENSAYE No. 1						
MUESTRA No. 2						
FUENTE DE MATERIAL: De la línea del camino.						
ANALISIS GRANULOMETRICO DE MATERIAL						
TAMIZ	3/4"	3/8"	4	10	40	200
% QUE PASA	100	98	93	66	30	13
LIMITE LIQUIDO: 40						
INDICE DE PLASTICIDAD: 6						
CLASIFICACION H.R.B: A-2-4 (0)						
EQUIVALENTE DE ARENA: -----						
TIPO DE PRUEBA EMPLEADA: Proctor Estándar						
PESO VOLUM. SECO MÁXIMO: 1509.78 Kg/m ³						
HUMEDAD OPTIMA: 17.45 %						
PRUEBAS DE C.B.R. SATURADA						
METOD DE COMPACTACIÓN EMPLEADO: Proctor Estándar						
PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN	90		95		100	
PESO VOLUM. SECO (Kg/m ³)	1340.8		1432.8		1529.9	
C.B.R. SATURADO (%)	7.6		14.6		21.7	
HINCHAMIENTO (%)	0.13		0.16		0.19	
TIEMPO DE SATURACIÓN (horas)	96		96		96	

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 36: Resumen de la prueba de C.B.R. para suelo A-6 (2), estación 0+500m.

PROYECTO: Diseño de pavimento rígido.						
CAMINO: Cuajachillo # 1 - Nejapa.						
ENSAYE No. 3						
MUESTRA No. 2						
FUENTE DE MATERIAL: De la línea del camino.						
ANALISIS GRANULOMETRICO DE MATERIAL						
TAMIZ	3/4"	3/8"	4	10	40	200
% QUE PASA	100	99	97	88	58	43
LIMITE LIQUIDO: 31			INDICE DE PLASTICIDAD: 13.9			
CLASIFICACION H.R.B: A-6 (2)			EQUIVALENTE DE ARENA: -----			
TIPO DE PRUEBA EMPLEADA: Proctor Estándar						
PESO VOLUM. SECO MÁXIMO: 1370.93 Kg/m ³						
HUMEDAD OPTIMA: 24.38 %						
PRUEBAS DE C.B.R. SATURADA						
METOD DE COMPACTACIÓN EMPLEADO: Proctor Estándar						
PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN				90	95	100
PESO VOLUM. SECO (Kg/m ³)				1224.6	1298.2	1383.8
C.B.R. SATURADO (%)				3	10	17.1
HINCHAMIENTO (%)				0.39	0.41	0.4
TIEMPO DE SATURACIÓN (horas)				96	96	96

Fuente: Elaboración Propia

3.5.2 Funcionalidad de los materiales a lo largo de trazado de la vía

Los suelos encontrados no cumplen con la graduación para capa de Terraplén – Subrasante según el cuadro 1003-25 de la norma Nic 2019 (Ver tabla 37, página 67).

Los suelos encontrados en la línea de camino la mayoría de ellos no cumplen con el valor de limite liquido ya que este valores son mayores del 30% (valor máximo), a excepción del suelo de la estación 0+750 m con clasificación A-2-4 (0) con un valor del 23%. Los suelos A-2-4 (0) y A-1-b (0) cumplen con el valor de índice de plasticidad ya que están por debajo del 10%, valor máximo según la Nic 2019 (Ver tabla 37, página 67).

Los suelos A-2-4 (0) y A-6 (2), según los resultados poseen valores de C.B.R. del 10% al 16.8% y el C.B.R. de diseño es de 12.8% el cual es menor que el valor del C.B.R. mínimo de 15% según las norma Nic 2019, por lo tanto no cumplen con la especificación (Ver tabla 37, página 67).

Estos suelos cumplen con el valor de hinchamiento lineal cuyo valor es de 0.5% máximo, y los valores obtenidos son menores que 0.5% (Ver tabla 37, página 67).

De forma general se puede decir que, el suelo proveniente del camino no cumple con las especificaciones mínimas según la norma Nic 2019.

Por lo tanto se utilizará material proveniente de un banco de material con el fin de mejorar la capacidad de soporte del suelo.

Tabla 37: Especificaciones del material para capa superior del Terraplén – Subrasante vs resultados de ensayo en las muestras de sondeos de línea

- (1) Gradación Cuadro 1003-36
- (2) Contenido de materia orgánica, AASHTO T-267 0,0% máx.
- (3) PH de los suelos. Azul de metileno, ASTM G-51 0,25 g/100 g máx.
- (4) Límite Líquido, AASHTO T 89 30 máx.
- (5) Índice de Plasticidad, AASHTO T 90, 10 máx.
- (6) CBR al 95% de AASHTO Modificado y 4 días de saturación 15% mín.
- (7) Hinchamiento lineal con molde CBR, AASHTO T-190..... 0,5% máx.
- (8) Contenido sales solubles, AASHTO T 290 0,2% máx.
- (9) Ausencia de suelos compresibles o colapsables

Cuadro 1003-25
Graduación Para Capa Superior Del Terraplen - Subrasante

Tamaño del tamiz	Tamaño del tamiz	Porcentaje en masa que pasa el tamiz designado (AASHTO T 27)
3"	75 mm	100
1"	25 mm	70 - 100
No. 4	4.75 mm	30 - 70
No. 10	2 mm	15 - 50
No.40	0.425 mm	8 - 15
No.200	0.075 mm	0 - 15

Fuente: Especificaciones generales para la construcción de caminos, calles y puentes, NIC 2019, Tomo II, sección 1003.22.2, página 831.

Estación (m)	Lado	Profundidad (cm)	Porcentaje que pasa por tamices					Límite %		Clasificación HRB	Humedad Natural (%)	C.B.R. a Compact.		
			1"	4	10	40	200	LL	IP			90%	95%	100%
0+000	Derecha	0 - 150	100	98	73	37	21	35	7	A-2-4 (0)	17.64	8.5	16.8	25.1
0+250	Izquierda	0 - 40	100	97	79	52	39	39.4	16.5	A-6 (2)	6.14	-	-	-
0+250	Izquierda	40 - 80	100	96	69	35	14	38	4	A-2-4 (0)	6.57	-	-	-
0+250	Izquierda	80 - 150	100	98	66	28	5	-	NP	A-1-b (0)	7.81	-	-	-
0+500	Derecha	0 - 100	100	93	66	30	13	40	6	A-2-4 (0)	13.42	7.6	14.6	21.7
0+500	Derecha	100 - 150	100	97	88	58	43	31	13.9	A-6 (2)	9.29	3	10	17.9
0+750	Izquierda	0 - 150	100	97	84	33	17	23	3	A-2-4 (0)	11.11	-	-	-
0+750	Izquierda	60 - 150	100	83	62	36	17	30	6	A-2-4 (0)	7.69	-	-	-
1+000	Derecha	0 - 150	100	99	79	29	13	-	NP	A-1-b (0)	4.71	-	-	-

Fuente: Elaboración Propia

3.6 Cálculo del C.B.R. de diseño

Para el cálculo del C.B.R. de diseño se utilizó el método del Instituto del Asfalto, que recomienda utilizar valores de 60,75, 87.5 por ciento de los valores individuales sea mayor o iguales que él, en dependencia del tránsito que circulará por el pavimento.

Para el tramo en estudio se tuvo un valor de 3, 533,270 de repeticiones esperadas, por lo tanto, se utilizará un percentil de 87.5% en el cálculo del C.B.R. de diseño.

Tabla 38: Valores percentiles por nivel de tránsito

Nivel de tránsito	Valor percentil para diseño de subrasante
< de 10,000 ESAL's	60
Entre 10,000 y 1,000,000 ESAL's	75
> de 1,000,000 ESAL's	87.5

Fuente: Manual Centroamericano para Diseño de Pavimentos, SIECA, Noviembre de 2002, Capítulo 7, página 29.

Para la selección de C.B.R. de diseño se utiliza el siguiente procedimiento:

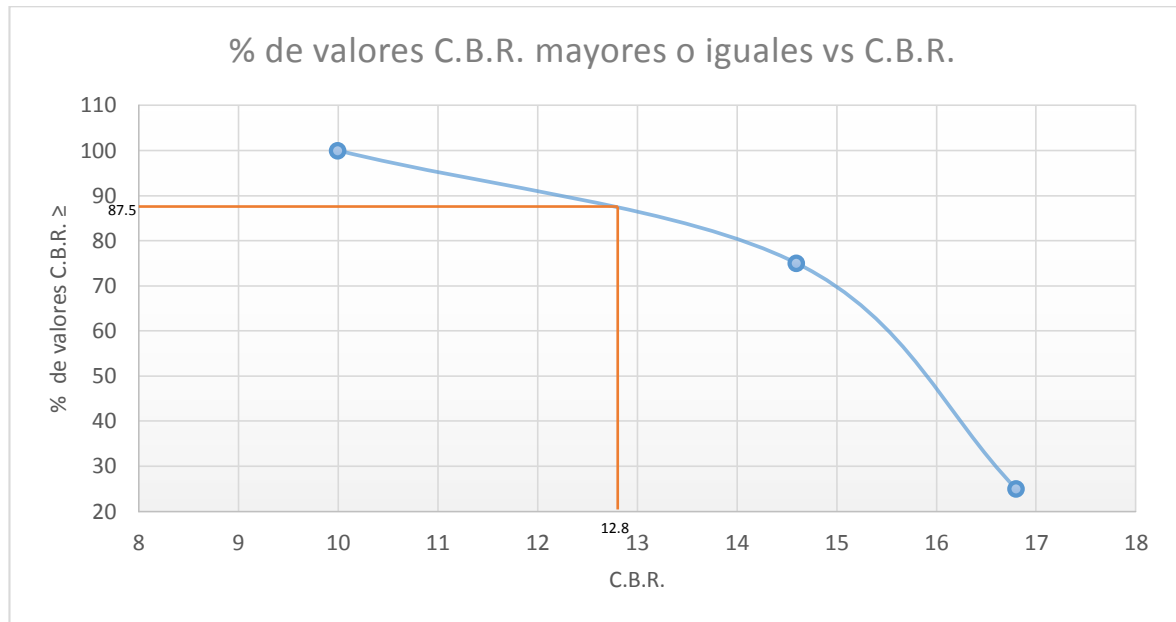
1. Se ordenó los valores de C.B.R. de menor a mayor.
2. Se calculó el número y porcentajes de los valores de C.B.R. mayores o iguales que él.
3. Se graficó los porcentajes de valores de mayores o iguales vs C.B.R.
4. El C.B.R. de diseño será el correspondiente a la ordenada 60%, 75% o 87,5%, en dependencia del tránsito en la vía.

Tabla 39: Valores y porcentajes de C.B.R.

Tipo de suelo	C.B.R. (95%)	Frecuencia	Número de valores $\geq$	% de valores C.B.R. $\geq$
A-6	10	1	4	100.0
A-2-4	14.6	2	3	75.0
A-2-4	16.8	1	1	25.0
	Total	4		

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 6: Porcentaje de C.B.R. vs C.B.R.



Fuente: Elaboración Propia

Los valores obtenidos de la gráfica son los siguientes:

- Para el 87.5% corresponde un C.B.R. de 12.8%.

Para determinar el valor de 12.8%, se trazó una línea a partir del valor de 87.5 que intersectara la curva, una vez logrado esto se trazó una línea que intersectara el eje de los valores de C.B.R.

De manera que, C.B.R. de diseño es igual al 12.8%.

De acuerdo con las Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Calles y puentes NIC 2019, en la sección 1003.22.2 establece que la capa de subrasante deberá tener un valor mínimo de C.B.R. al 95% de compactación igual al 15%.

Por lo tanto, como el C.B.R. de diseño de 12.8 resultó menor al 15%, este no cumple con el valor mínimo para que los suelos encontrados en la vía sean utilizados como capa de subrasante. Ver tabla 40, página 70.

Tabla 40: Especificaciones del material para capa superior del Terraplén – Subrasante

(1) Gradación	Cuadro 1003-36
(2) Contenido de materia orgánica, AASHTO T-267	0,0% máx.
(3) PH de los suelos. Azul de metileno, ASTM G-51	0,25 g/100 g máx.
(4) Límite Líquido, AASHTO T 89	30 máx.
(5) Índice de Plasticidad, AASHTO T 90,	10 máx.
(6) CBR al 95% de AASHTO Modificado y 4 días de saturación	15% mín.
(7) Hinchamiento lineal con molde CBR, AASHTO T-190.....	0,5% máx.
(8) Contenido sales solubles, AASHTO T 290	0,2% máx.
(9) Ausencia de suelos compresibles o colapsables	

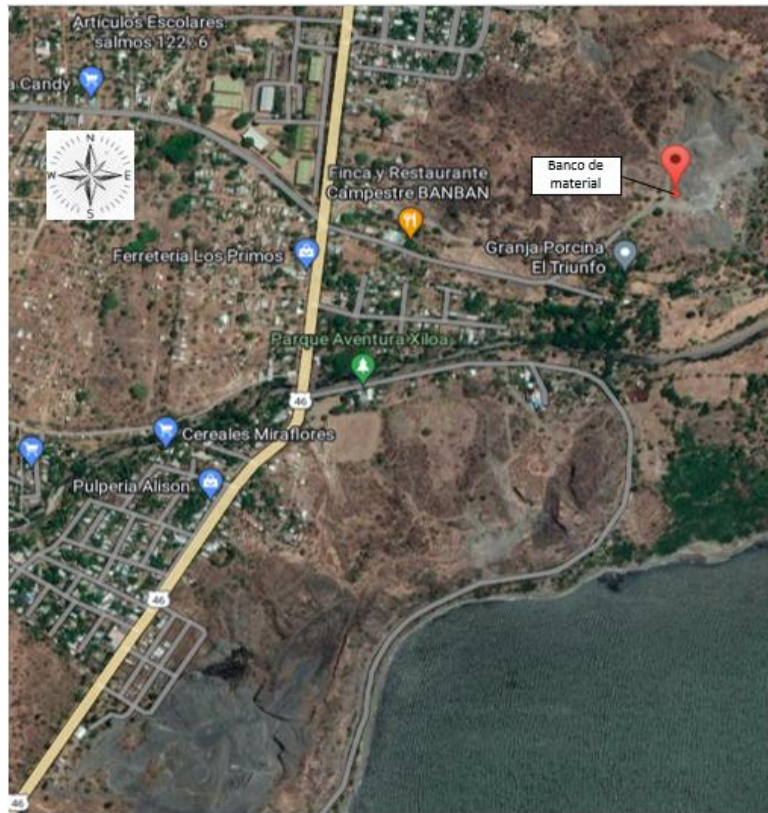
Fuente: Especificaciones generales para la construcción de caminos, calles y puentes, NIC 2019, Tomo II, sección 1003.22.2, página 831.

Por lo tanto, se hará uso de un banco de materiales con el fin de obtener una material de que cumpla con el valor mínimo de CBR para ser utilizado en el diseño de la estructura de pavimento.

3.7 En las áreas de fuentes de materiales

Para el tramo en estudio se propone utilizar como subbase el material proveniente del banco de material Miraflores, ubicado en el departamento de Managua, municipio de Ciudad Sandino en el km 13 carretera Nueva a León, 2.2 km carretera a Xiloa, con coordenadas: N 12° 11' 29", W 86° 19' 48". El banco está a 10 km del inicio de tramo del camino en estudio. Ver imagen 4, macro localización del banco de material Miraflores, página 71.

Imagen 4: Micro localización del banco de material Miraflores



Fuente: <https://www.google.com/maps/@12.1871192,-86.3375094,16z?entry=ttu>

El banco tiene un área de 60,000 m² y aunque se desconoce el volumen total, este proporcionará material suficiente que podrá ser utilizado para la construcción de los distintos espesores que componen la estructura de pavimento debido a que el tramo en estudio es 1 kilómetro.

3.7.1 Humedad y límites de Atterberg

La humedad del material de banco fue de 3.35%. Este material presento características no plásticas (NP), debido a que es un material arenoso, por lo que el ensayo no pudo ser realizado. Ver tabla en anexo, tabla 64, página XI.

En la tabla 41, se presenta los valores de índice de plasticidad según el tipo de suelo. En esta se observa que las arenas (material granular) poseen características No Plásticas.

Tabla 41: Límites de Atterberg para suelos típicos

Tipo de suelo	LL (%)	LP(%)	IP (%)
Arena	-	No Plástico	-
Limo	30 – 40	20 – 25	10 – 15
Arcilla	40 – 150	25 – 50	15 – 100

Fuente: Soil Mechanics and foundations, 3ª Edición, Muni Budhu, página 62.

3.7.2 Granulometría y clasificación H.R.B.

Se procedió a determinar la distribución de tamaños de las partículas del material proveniente de banco dando como resultado los datos mostrados en la tabla 42.

Su clasificación general fue material granular, con subgrupo A-1-a (0), con características de excelente a buena.

Tabla 42: Granulometría y clasificación H.R.B.

Muestra No.	Porcentaje que pasa por tamices											Clasificación HRB
	3"	2"	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4	10	40	200	
1	100	100	100	92	85	78	70	63	44	21	6	A-1-a (0)

Fuente: Elaboración Propia

De acuerdo con la NIC 2019, sección 1003.8 establece la gradación para agregados utilizados para subbase o base que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 43: Márgenes del valor meta para gradaciones de subbase, base o capas superficiales de agregados

Abertura de la malla (pulg)	Abertura de la malla (mm)	Porcentaje por peso pasando la malla cuadrada				
		AASHTO T 27 y AASHTO T 11				
		Requerimientos de Granulometría				
		A (Sub-base)	B (Sub-base)	C (Base)	D (Base)	E (Base)
2 1/2"	63 mm	100				
2"	50 mm	97 – 100	100	100		
1 1/2"	37.5 mm		97 – 100	97 – 100	100	
1"	25 mm	65 – 79 (6)			97 – 100	100
3/4"	19 mm			67 – 81 (6)		97 – 100
1/2"	12.5 mm	45 – 59 (7)	60-80 (7)			
3/8"	9.5 mm				56 – 70 (7)	67 – 79 (6)
No. 4	4.75 mm	28 – 42 (6)	40 – 60 (8)	33 – 47 (6)	39 – 53 (6)	47 – 59 (7)
No.40	425 Lim	9 – 17 (4)		10 – 19 (4)	12 – 21 (4)	12 – 21 (4)
No.200	75 Lim	4 – 8 (3)	0 – 12 (4)	4 – 8 (3)	4 – 8 (3)	4 – 8 (3)

() Desviación (±) permisible

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Calles y Puentes, NIC 2019, Tomo II, sección 1003.8, Página 811.

Una vez comparado los márgenes con los resultados del análisis granulométrico el material cumple con las especificaciones para subbase tipo B.

3.7.3 Compactación de suelo (Proctor Modificado)

El método proctor modificado consiste en compactar una muestra de suelo colocado en cinco capas aplicando 56 golpes por cada capa dejando caer un martillo de compactación de 5 kg de una altura de 45 cm en un molde utilizando distintos contenidos de humedad, los que sean necesarios para crear una curva de compactación y así determinar la densidad seca máxima y una humedad óptima.

Los resultados obtenidos del ensayo se muestran a continuación:

Tabla 44: Resultados de ensayo proctor modificado para material de banco Miraflores

Tipo de ensayo	Modificado	Método de ensayo	D-180
DETERMINACIÓN DE LA DENSIDAD			
Ensayo N°	1	2	3
Molde N°	B1	B1	B1
N° de capas	5	5	5
N° de golpes por capas	56	56	56
Peso del molde + peso suelo compactado (gr)	10769	11133	11139
Peso del molde vacío (gr)	6610	6610	6610
Peso suelo compactado (gr)	4159	4523	4529
Volumen del molde (cm ³)	2124	2124	2124
Densidad Húmeda (kg/m ³)	1958.10	2129.47	2132.30
Densidad Seca (kg/m ³)	1840.95	1938.52	1889.60
DETERMINACION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD			
Prueba N°	2	3	4
Tara N°	A-12	B-14	PI-03
Peso de la tara + suelo húmedo (gr)	123.7	115.7	171.3
Peso de la tara + suelo seco (gr)	118.8	107.8	157.3
Peso de la tara (gr)	41.8	27.6	48.3
Peso suelo seco (gr)	77	80.2	109
Contenido de Humedad (%)	6.36	9.85	12.84
Densidad Seca Máxima (Kg/m ³)			
1939.14			
Humedad Óptima (%)			
10.15			

Fuente: Elaboración Propia

Ejemplo de cálculo para el ensayo numero 1:

Cálculos para determinar la humedad

$$\text{Peso suelo seco} = (\text{Peso tara} + \text{suelo seco}) - (\text{Peso tara}) = 118.8 - 41.8 = 77 \text{ gr}$$

$$\% \text{ de humedad} = \frac{(\text{Peso tara} + \text{suelo húmedo}) - (\text{Peso suelo seco}) - (\text{Peso tara})}{\text{Peso suelo seco}} * 100$$

$$\% \text{ de humedad} = \frac{123.7 - 77 - 42.8}{77} * 100 = 6.36$$

Cálculos para determinar la densidad

$$\text{Peso suelo compactado} = (\text{Peso molde} + \text{suelo compactado}) - (\text{Peso molde vacío})$$

$$\text{Peso suelo compactado} = 10769 - 6610 = 4159 \text{ gr}$$

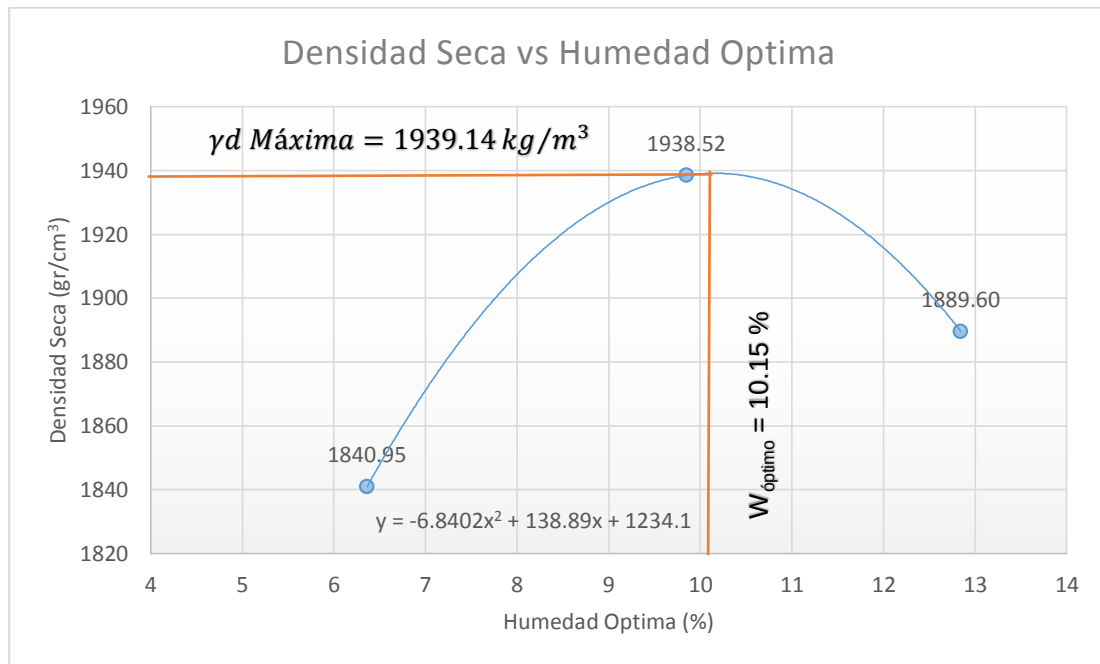
$$\text{Densidad Humeda } (\gamma_h) = \frac{\text{Peso suelo compactado}}{\text{Volumen del molde}} * \text{Factor de conversión} = \frac{4159}{2124} * 1000 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Densidad Humeda } (\gamma_h) = 1958.10 \text{ kg/m}^3$$

$$\text{Densidad Seca } (\gamma_d) = \frac{\text{Densidad humeda } (\gamma_h)}{1 + \frac{\% \text{ de humedad}}{100}} = \frac{1958.10 \text{ kg/m}^3}{1 + \frac{6.36}{100}} = 1840.95 \text{ kg/m}^3$$

De igual manera se determinó estos valores para el resto de ensayos.

Gráfica 7: Densidad máxima seca vs Humedad óptima



Fuente: Elaboración Propia

Según los resultados obtenidos el material de banco alcanzan una densidad máxima seca de 1939.14 Kg/m³ y una humedad óptima de 10.15 %.

Los valores anteriormente calculados se utilizarán para determinar el CBR del material del banco.

3.7.4 Relación de soporte de California (C.B.R.)

Se determinó los valores de C.B.R. y de hinchamiento para el material de banco A-1-a, utilizando tres especímenes compactadas cada una de ellas con diferente energía de compactación, dando 10, 25 y 65 golpes. Luego se sometieron a un tiempo de saturación de 96 horas antes de realizar el ensayo.

En anexo, tabla 65, página XII, se encuentran detallados los datos del ensayo. A continuación se presentan un resumen de los resultados obtenidos:

Tabla 45: Resumen de la prueba de C.B.R. para material de banco Miraflores

PROYECTO: Diseño de pavimento rígido.						
CAMINO: Cuajachillo # 1 - Nejapa.						
ENSAYE No. 1						
MUESTRA No. 1						
FUENTE DE MATERIAL: Banco de préstamos Miraflores.						
ANALISIS GRANULOMETRICO DE MATERIAL						
TAMIZ	3/4"	3/8"	4	10	40	200
% QUE PASA	85	70	63	44	21	6
LIMITE LIQUIDO: -----						
INDICE DE PLASTICIDAD: NP						
CLASIFICACION H.R.B: A-1-a (0)						
EQUIVALENTE DE ARENA: -----						
TIPO DE PRUEBA EMPLEADA: Proctor Modificado						
PESO VOLUM. SECO MÁXIMO: 1939.14 Kg/m ³						
HUMEDAD OPTIMA: 10.15 %						
PRUEBAS DE C.B.R. SATURADA						
METOD DE COMPACTACIÓN EMPLEADO: Proctor Modificado						
PORCENTAJE DE COMPACTACIÓN	90		95		100	
PESO VOLUM. SECO (Kg/m ³)	1665.1		1834		1949.7	
C.B.R. SATURADO (%)	33.3		56.4		79.5	
HINCHAMIENTO (%)	0.09		0.08		0.09	
TIEMPO DE SATURACIÓN (horas)	96		96		96	

Fuente: Elaboración Propia

3.7.5 Funcionalidad de los materiales en la fuente de material

Este cumple con la graduación requeridos para subbase tipo B, ya que cumple con las de abertura de mallas tales como: 2", 1 1/2", 1/2", N° 4, N° 200, por lo que se propone como material para ser utilizado como subbase (Ver tabla 42 y 43, página 72 y 73).

El índice de plasticidad para subbase es 6 máximo y para base es 0 (NP) máximo, y el material en estudio tiene propiedades no plásticas (NP), por lo que cumple con las especificaciones tanto para subbase y base (Ver tabla 46, página 78).

El valor de C.B.R. para subbase y base son 30% y 80% respectivamente compactado al 95% de proctor modificado, y el material propuesto obtuvo un valor de 56.4%, cumpliendo con el valor mínimo para subbase. En cambio para base el material está por debajo del valor mínimo, por lo tanto, no cumple según la Nic 2019 (Ver tabla 46, página 78).

De manera que, el material del banco Miraflores reúne los requisitos para ser utilizado como material de subbase de la estructura de pavimento.

Tabla 46: Especificaciones de agregados para Subbase o Base vs resultados de ensayos en muestra de banco de material Miraflores

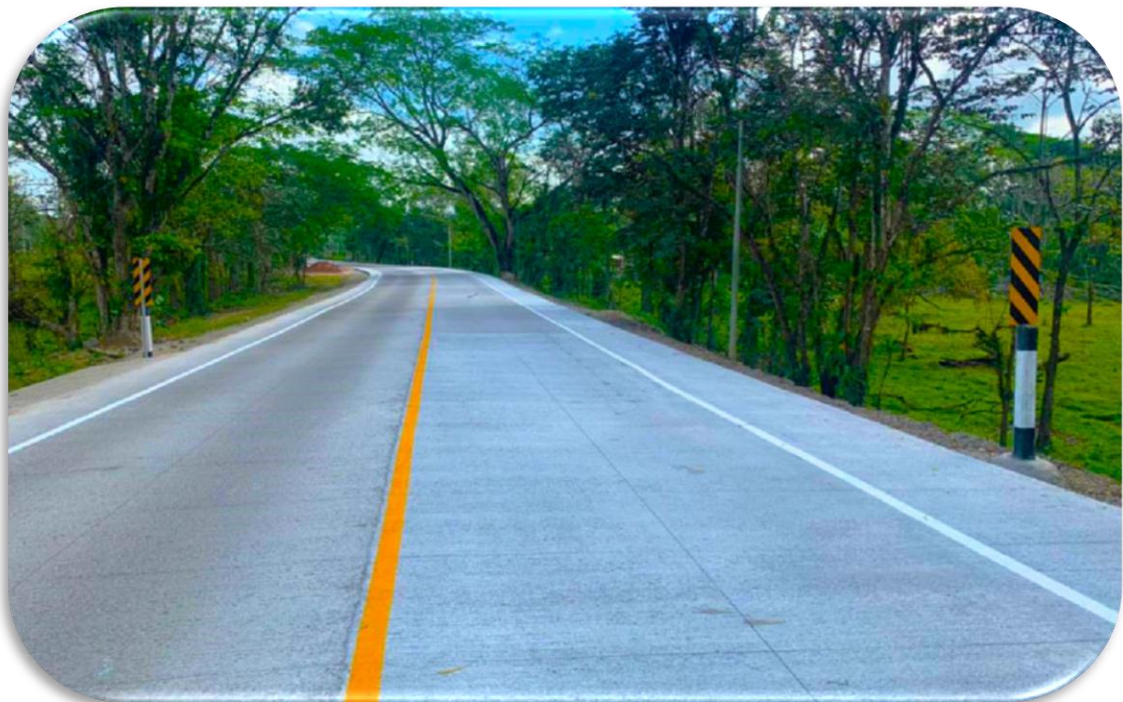
(1) Gradación	Cuadro 1003-6
(2) Límite Líquido, AASHTO T 89	25 máx.
(3) Índice de Plasticidad, AASHTO T 90	
a. Subbase	6 máx.
b. Base	0 máx. (NP)
(4) Desgaste Los Ángeles, AASHTO T 96	
a. Subbase	40% máx.
a. Base	35% máx
(5) CBR, AASHTO T-190	
b. Subbase, al 95% de Proctor Modificado (AASHTO T 180) y 4 días de saturación	30% mín.
c. Base, al 95% de Proctor Modificado (AASHTO T 180) y 4 días de saturación	80% mín.
(6) Equivalente de arena, AASHTO T-176	
d. Árido fino de base	25 mín.
(7) Deflexión dinámica (viga Benkelman)	
e. Subbase	250/100 mm máx.
f. Base	200/100 mm máx.
(8) Placa de carga (Módulo de Deformación)	
g. Subbase	80 MPa mín.
h. Base	120 MPa mín.

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Calles y Puentes, NIC 2019, Tomo II, sección 1003.8.(b), Páginas 809 y 810.

Muestra No.	Límite %		Clasificación HRB	Humedad Natural (%)	PVSS (kg/m^3)	PVSC (kg/m^3)	Proctor Modificado (kg/m^3)	C.B.R. a Compact.		
	LL	IP						90%	95%	100%
1	-	NP	A-1-a (0)	3.35	1491	1588	1939.14	33.3	56.4	79.5

Fuente: Elaboración Propia.

CAPÍTULO IV. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DE PAVIMENTO RÍGIDO POR EL MÉTODO DE LA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION (PCA)

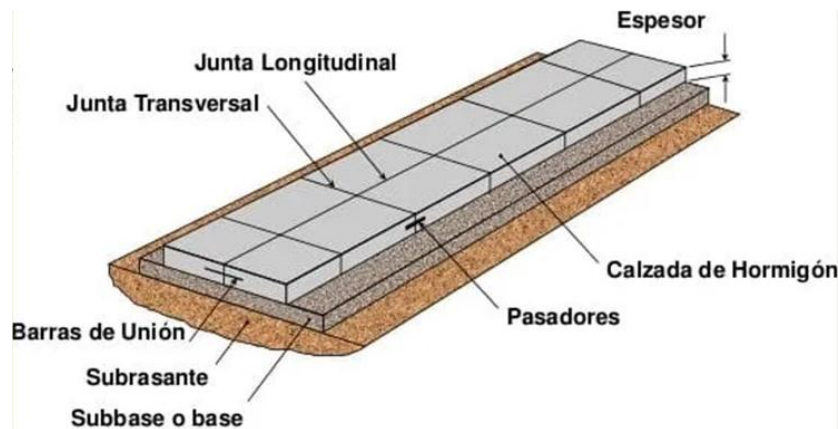


4.1 Introducción

Los pavimentos rígido están conformados por losas de concreto apoyadas sobre una estructura granular calculada de acuerdo a la capacidad de soporte del terreno, que en algunos casos se denominada subbase o base, y al volumen de tránsito, para garantizar su rigidez. Se le llama rígido porque al ser sometido a las cargas de tránsito deben ser prácticamente nulas las deformaciones que ocurran.

A continuación se muestra una imagen con los elementos básicos que componen una estructura de pavimento rígido:

Imagen 5: Elementos de una estructura de pavimento rígido



Fuente: Canal COSREC. (23 de julio de 2020). DISEÑO DE PAVIMENTO RÍGIDO - Método AASHTO 93 (Paso a paso). [Archivo de Vídeo]. Youtube. <https://www.youtube.com/watch?v=gy10Rg5pwjY>

El método de la PCA considera dos criterios de diseño:

- Fatiga
- Erosión

El análisis por fatiga sirve para mantener los esfuerzos del pavimento debido a cargas repetidas, dentro de los límites seguros previniendo así el agrietamiento por fatiga; y el análisis por erosión sirve para limitar los efectos de las deflexiones del pavimento en el borde de las losas, juntas y esquinas controlando así la erosión de la fundación y de los materiales de las bermas.

4.2 Factores de diseño

El espesor de diseño de la losa es determinado en base a los cuatro factores de siguientes:

1. Resistencia del concreto a la flexión (módulo de ruptura, MR)
2. Resistencia de la subrasante, o subrasante y subbase combinadas (k).
3. Los pesos, frecuencias, y tipos de cargas axiales que el pavimento soportara.
4. El periodo de diseño.

Estos factores se desarrollarán a continuación:

4.2.1 Resistencia del concreto a la flexión (módulo de ruptura, MR)

La consideración de la resistencia a la flexión del concreto es aplicable en el procedimiento de diseño para el criterio de fatiga que controla el agrietamiento del pavimento bajo repeticiones de cargas.

Según la Nic 2019 en la sección 501.3 para Pavimento de Concreto de Cemento Hidráulico especifica que la resistencia a la flexotracción del concreto a los 28 días para pavimento será de 4.5 Mpa (652.5 psi).

Tabla 47: Dosificación y condiciones del concreto para pavimento

Relación Agua/Cemento (Máxima) (1)	Temperatura de Concreto	Revenimiento	Contenido de Aire (%)	Tamaño del Agregado (AASHTO M 43)	Resistencia a la flexotracción a los 28 días (Mín- ima)
0.49	20 + 10°C	40 + 20 mm	3 ½ máx.	No. 57 ó 67	4.5 MPa

Fuente: Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Calles y Puentes, NIC 2019, Tomo I, Sección 501.3, página 318.

4.2.2 Resistencia de la subrasante, o subrasante y subbase combinadas (k)

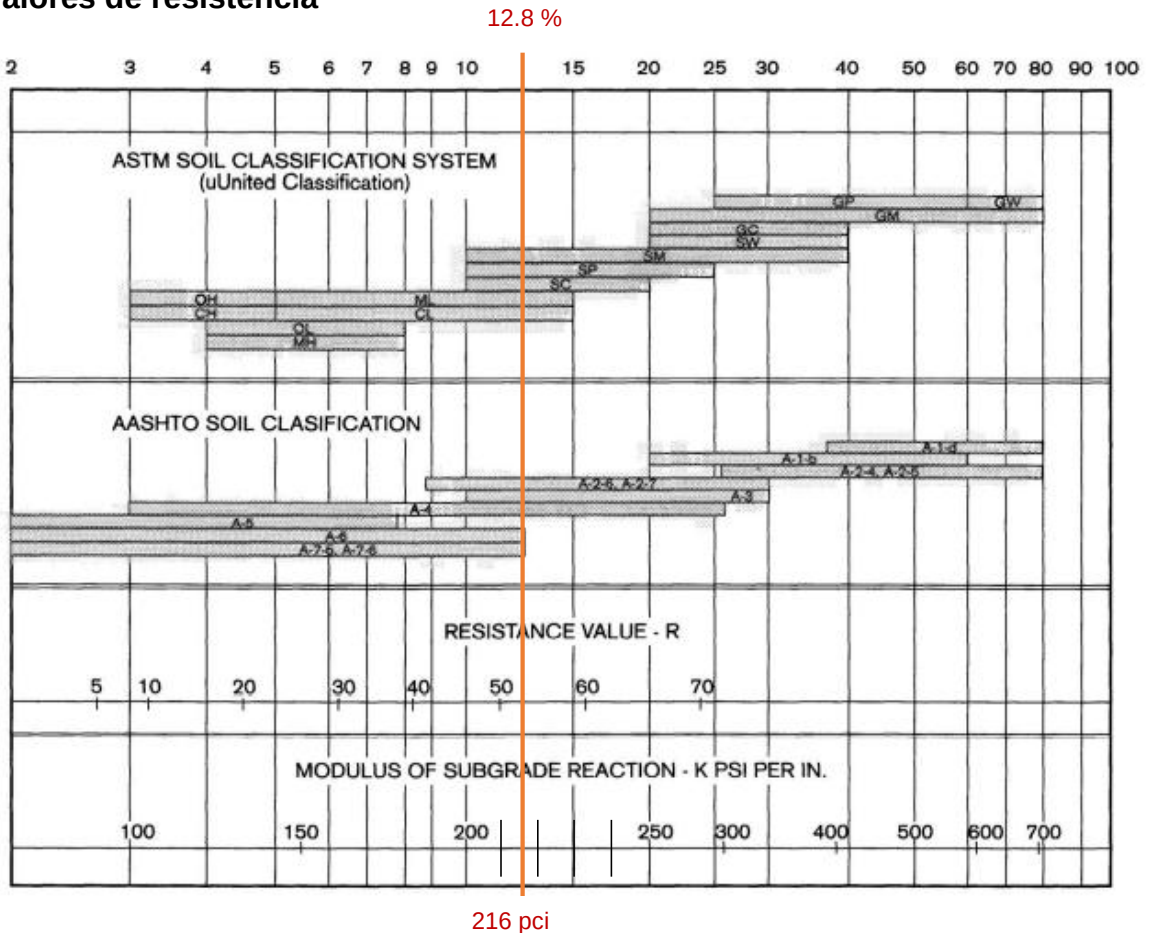
La resistencia de la subrasante o subrasante y subbase combina (k), se refiere a la capacidad de soporte del terreno que sirve de apoyo para un pavimento de concreto y es definido en términos el módulo de reacción de la subrasante de Westergaard.

Este es igual a la carga en libras por pulgadas cuadradas de un plato de 30" de diámetro, dividido entre la deformación en pulgadas que provoca dicha carga. Los valores de k son expresados como libras por pulgadas cuadradas por pulgadas (psi/in) o más comúnmente, por libras por pulgadas cúbicas, PCI (Lb/in^3).

Dado que la prueba de placa toma tiempo y dinero, los valores de k son usualmente estimados mediante una correlación de pruebas más simples como la del valor relativo de soporte. El resultado es válido por que no se requiere una exacta determinación del k , ya que variaciones normales de este no afectan significativamente los requerimientos del espesor del pavimento.

En el capítulo anterior se determinó el valor del C.B.R. de diseño de la subrasante, dando como resultado 12.8%, al entrar con este valor en el nomograma trazando una línea que intersecte el eje de módulo de reacción de la subrasante (k) se obtuvo un valor de 216 pci.

Imagen 6: Relación aproximada entre las clasificaciones del suelo y sus valores de resistencia



Fuente: Manual de Diseño y Construcción de Pavimento CEMEX, página 50.

Debido a que el C.B.R. de diseño no cumple con el valor mínimo requerido por la norma NIC 2019 (tomo II, sección 1003.22.2, página 831), ya que es menor que el 15% del proctor modificado, se propone utilizar una subbase de 6 pulgadas de espesor con el fin de mejorar la capacidad de soporte del suelo. Por lo tanto, el módulo de reacción de la subrasante (k) se modifica de acuerdo a la tabla siguiente:

Tabla 48: Incremento en el valor de k del suelo, según el espesor de una subbase granular

k - Suelo - Sub-base (pci)				
k del Suelo (pci)	Espesor de la sub-base			
	4"	6"	9"	12"
50	65	75	85	110
100	130	140	160	190
200	220	230	270	320
300	320	330	370	430

Fuente: Manual de Diseño y Construcción de Pavimento CEMEX, página 51.

Los valores extremos para el k de 216 son 200 y 300, que para un espesor de 6" son 230 y 330 respectivamente. Realizando la interpolación se obtiene el siguiente resultado:

Tabla 49: K del suelo - Subbase

K del suelo (pci)	Espesor de la Subbase de 6"	K Suelo-Subbase (pci)
300	330	K = 246
216	X	
200	230	

Fuente: Elaboración Propia

4.2.3 Los pesos, frecuencias, y tipos de cargas axiales que el pavimento soportara

La cantidad y pesos de las cargas axiales esperadas durante el periodo de diseño son los factores principales en el diseño de espesores de pavimentos de concreto.

El método emplea los datos del tráfico esperado, como es el Tránsito Diario Promedio Anual (TPDA) y la composición vehicular del tráfico. Con esta información obtenemos el número de repeticiones esperadas para cada tipo de eje durante el periodo de diseño.

A continuación se presentan los datos obtenidos de repeticiones esperadas por tipo de eje:

Tabla 50: Sumatoria y agrupación de las repeticiones esperadas por peso y tipo de eje

Tipo de eje	Peso en Kips	Total repeticiones
Sencillo	2.2	2,213,425
	4.4	580,318
	8.8	251,643
	11	154,069
	17.6	169,474
	22	128,390
Tándem	35.2	20,544
	36.3	15,407
Total de repeticiones		3,533,270

Fuente: Elaboración Propia

4.2.4 Periodo de diseño

El término de periodo de diseño es algunas veces considerado sinónimo de periodo de análisis de tráfico. Dado que el tráfico muy probablemente no puede ser supuesto con precisión por un periodo muy largo, el periodo de diseño de 20 años es el comúnmente empleado en el procedimiento de diseño de pavimentos. Este periodo ya se había definido en el capítulo de tránsito, considerando un tiempo de 20 años.

4.3 Factor de seguridad de carga

Una vez conocido la distribución de cargas por ejes, es decir, ya que se conoce cuantas repeticiones se tendrán para cada tipo y peso de eje, se utiliza el factor de seguridad de carga para multiplicarse por las cargas por eje.

Los factores de seguridad de carga recomendados son:

- Casos especiales con muy altos volúmenes de tráfico pesado y cero mantenimiento será 1.3.

- Para Autopistas o vialidades de varios carriles en donde se presentará un flujo ininterrumpido de tráfico y altos volúmenes de tráfico pesado será 1.2.
- Autopistas y vialidades urbanas con volúmenes moderados de tráfico pesado será 1.1.
- Caminos y calles secundarias con muy poco tráfico pesado será 1.

En este caso se recomienda utilizar el factor de seguridad de carga igual a 1 debido a que se presenta bajo tráfico pesado en la vía.

4.4 Esfuerzo equivalente

En el procedimiento de la PCA, la determinación del esfuerzo equivalente está basado en el esfuerzo máximo de deflexión en el borde de la losa, que ocurre cuando el camión se coloca cerca o sobre los bordes del pavimento y a la mitad de las juntas transversales.

Para el cálculo del esfuerzo equivalente el método toma en consideración 4 posibles casos para el diseño de pavimento los cuales son:

- Pavimento sin pasajuntas y sin apoyo lateral
- Pavimento sin pasajuntas y con apoyo lateral
- Pavimento con pasajuntas y sin apoyo lateral
- Pavimento con pasajuntas y con apoyo lateral

Para el diseño se propone el uso de un pavimento con pasajuntas y sin apoyo lateral, debido a las siguientes consideraciones:

- Debido a que el porcentaje de vehículos pesados es del 8.22% de TPDA₂₀₂₁, no se considera necesario el uso de apoyo lateral (bordillo o berma de concreto).
- El porcentaje de vehículos pesados es del 8.22% de TPDA₂₀₂₁ y aunque este no es alto, se utilizará barras pasajuntas para hacer efectivo la transferencia de cargas.

Para determinar el valor de esfuerzo equivalente para los ejes sencillos y tándem se utilizará las tablas recomendadas por el manual de la Cemex, según el tipo de

pavimento a diseñar que en este caso se trata de un pavimento con pasajuntas y sin apoyo lateral (Ver anexo, tabla 66, página XIII).

Se propone utilizar un espesor inicial de losa de 7 pulgadas para el cual se realizará los cálculos para el análisis de fatiga y de erosión. El espesor de prueba resultará inadecuado si la fatiga total o el daño por erosión son mayores que el 100%. Si esto ocurre, se seleccionará otro espesor de prueba para otra iteración hasta que los daños sean cercanos al 100%.

Los valores de esfuerzos equivalentes para ejes sencillos y tandem son los siguientes:

Tabla 51: Cálculo de esfuerzo equivalente para ejes sencillo y tandem para losa de 7 pulgadas

Tipo de eje	k de subrasante (pci)		
	200	246	300
Sencillo	292	283	272
Tándem	244	234	222

Fuente: Elaboración Propia

4.5 Relación de esfuerzo

La relación de fuerza se calcula dividiendo el esfuerzo equivalente entre el módulo de ruptura del concreto. Su ecuación es:

$$R. esf = \frac{\text{Esfuerzo equivalente}}{\text{Módulo de ruptura}} \quad (\text{Ecuación 34})$$

La relación de esfuerzo para los ejes sencillo y tandem se muestran a continuación:

$$R. esf \text{ (eje sencillo)} = \frac{283}{652.5} = 0.43$$

$$R. esf \text{ (eje tandem)} = \frac{234}{652.5} = 0.36$$

4.6 Análisis por fatiga

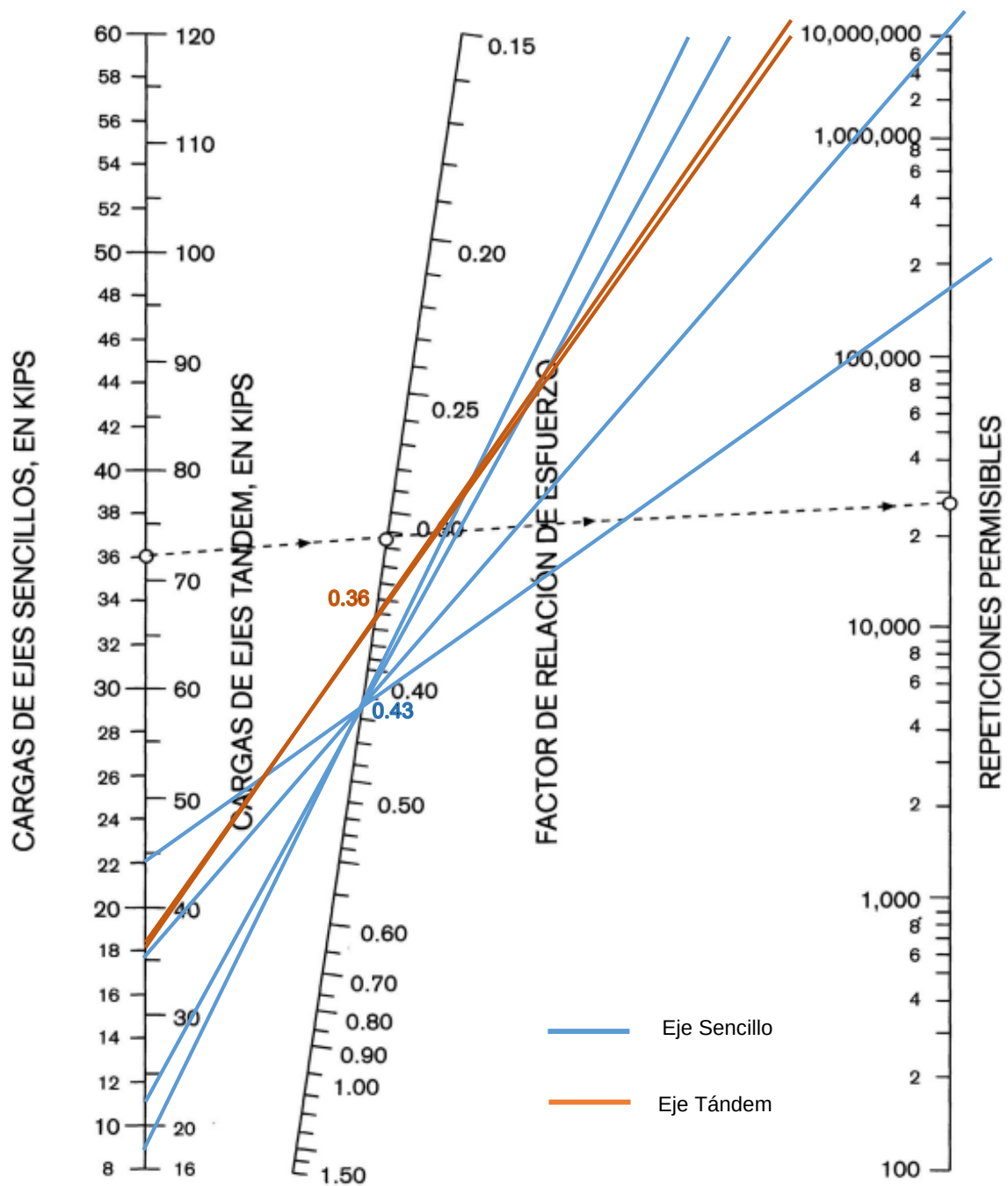
Este análisis pretende determinar las repeticiones permisibles para prevenir el agrietamiento de la losa por la acción de cargas repetidas.

Para calcular las repeticiones permisibles para cada tipo de eje, por el análisis por fatiga, se emplea un nomograma, el peso y el tipo de eje, así como su relación de esfuerzos.

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- Se entra en la imagen 7 con el peso de eje ya multiplicada por su factor de seguridad.
- Esta se une con el valor de relación de esfuerzo.
- Unir los dos puntos con una línea recta y extendiéndola hasta la escala de repeticiones permisibles.
- Si la línea no intersecta la escala de repeticiones permisibles estas repeticiones serán ilimitadas, de lo contrario se anotara el valor obtenido.
- Este mismo procedimiento se hace para todos los ejes.

Imagen 7: Nomograma para análisis de Fatiga (repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con o sin apoyo lateral)



Fuente: Nomograma proporcionado por Manual de Diseño y Construcción de Pavimento CEMEX, página 58. Trazado, Elaboración Propia.

Cálculo y resultado para ejes sencillos de 8.8 Kips y 22 Kips:

En este análisis se consideran los ejes con peso de 8.8 Kips a más (ver tabla 50, página 84), por lo cual, los ejes con peso de 2.2 kips y 4.4 kips no serán tomados en cuenta, ya que el nomograma considera cargas de 8 kip en adelante correspondientes al tráfico pesado despreciando el tráfico ligero.

Para eje de 8.8 Kips:

Peso de eje = 8.8 Kips

Factor de seguridad de carga = 1

*Peso de eje * Factor de seguridad de carga = 8.8 Kips * 1 = 8.8 Kips*

Para un peso de eje igual a 8.8 Kips (eje sencillo), se entra en la imagen 7 con la carga ya multiplica por su factor de seguridad; la carga en el eje será de 8.8 Kips, se une con el valor de relación de esfuerzo de 0.43, de manera que uniendo los dos puntos con una línea recta y extendiéndola hasta la escala de repeticiones permisibles, este no intersecta la escala de repeticiones permisible, por lo que se considera ilimitado o mayor de 10,000,000.

Para eje de 22 Kips:

Peso de eje = 22 Kips

Factor de seguridad de carga = 1

*Peso de eje * Factor de seguridad de carga = 22 Kips * 1 = 22 Kips*

En cambio, para un eje con peso de 22 Kips (eje sencillo), se entra en la imagen 7 con la carga ya multiplica por su factor de seguridad; la carga en el eje será de 22 Kips, se une con el valor de relación de esfuerzo de 0.43, de manera que uniendo los dos puntos con una línea recta y extendiéndola hasta la escala de repeticiones permisibles, encontremos el valor de 180,000 repeticiones permisible para este eje en específico.

Este mismo procedimiento se realiza para todos los ejes.

4.6.1 Daño por fatiga

El daño por fatiga se calcula expresando como porcentaje la relación entre las repeticiones esperadas y las repeticiones permisibles por cien. Su ecuación es:

$$\% \text{ de daño por fatiga} = \frac{\text{Repeticiones esperadas}}{\text{Repeticiones permisibles}} * 100 \quad (\text{Ecuación 35})$$

Ejemplo de cálculo para ejes sencillos de 8.8 Kips y 22 Kips:

Para los ejes de 8.8 Kips al tener un valor de repeticiones permisibles ilimitadas el porcentaje de daño por fatiga es igual a cero.

En cambio, para el eje de 22 Kips las repeticiones permisibles es igual a 180,000 y las repeticiones esperadas son 128,390 por lo que, el porcentaje de daño es igual a:

$$\% \text{ de daño por fatiga} = \frac{\text{Repeticiones esperadas}}{\text{Repeticiones permisibles}} * 100 = \frac{128,390}{180,000} * 100 = 71.33 \%$$

De igual manera se calculan todos los porcentajes de daño para fatiga para cada tipo y peso de eje.

4.7 Análisis por erosión

El análisis de erosión controla las fallas del pavimento tales como bombeo, erosión del terreno de soporte y diferencia de elevación en las juntas que son relacionadas más a las deflexiones del pavimento. La deflexión más crítica es en la esquina de la losa, cuando la carga del eje se ubica en la junta, cerca de la esquina.

En el análisis de erosión se calcula primero el factor de erosión, empleando las tablas correspondientes, dependiendo si se cuente o no con pasajuntas y además, si se tiene o no apoyo lateral, encontrándose un factor de erosión para cada tipo de eje (sencillo, tandem y tridem).

4.7.1 Factor de erosión

El factor de erosión nos permite entrar en el nomograma para determinar las repeticiones permisibles haciendo uso de las cargas por eje, al unir estos valores con una línea recta.

Para este cálculo se utilizó la tabla 67 (Ver anexo, tabla 67, página XIV), la cual proporciona los valores límites para un k de 246 pci.

Una vez realizadas las interpolaciones para los factores de erosión los valores fueron los siguientes:

Tabla 52: Cálculo de factor de erosión para ejes sencillo y tándem para losa de 7 pulgadas

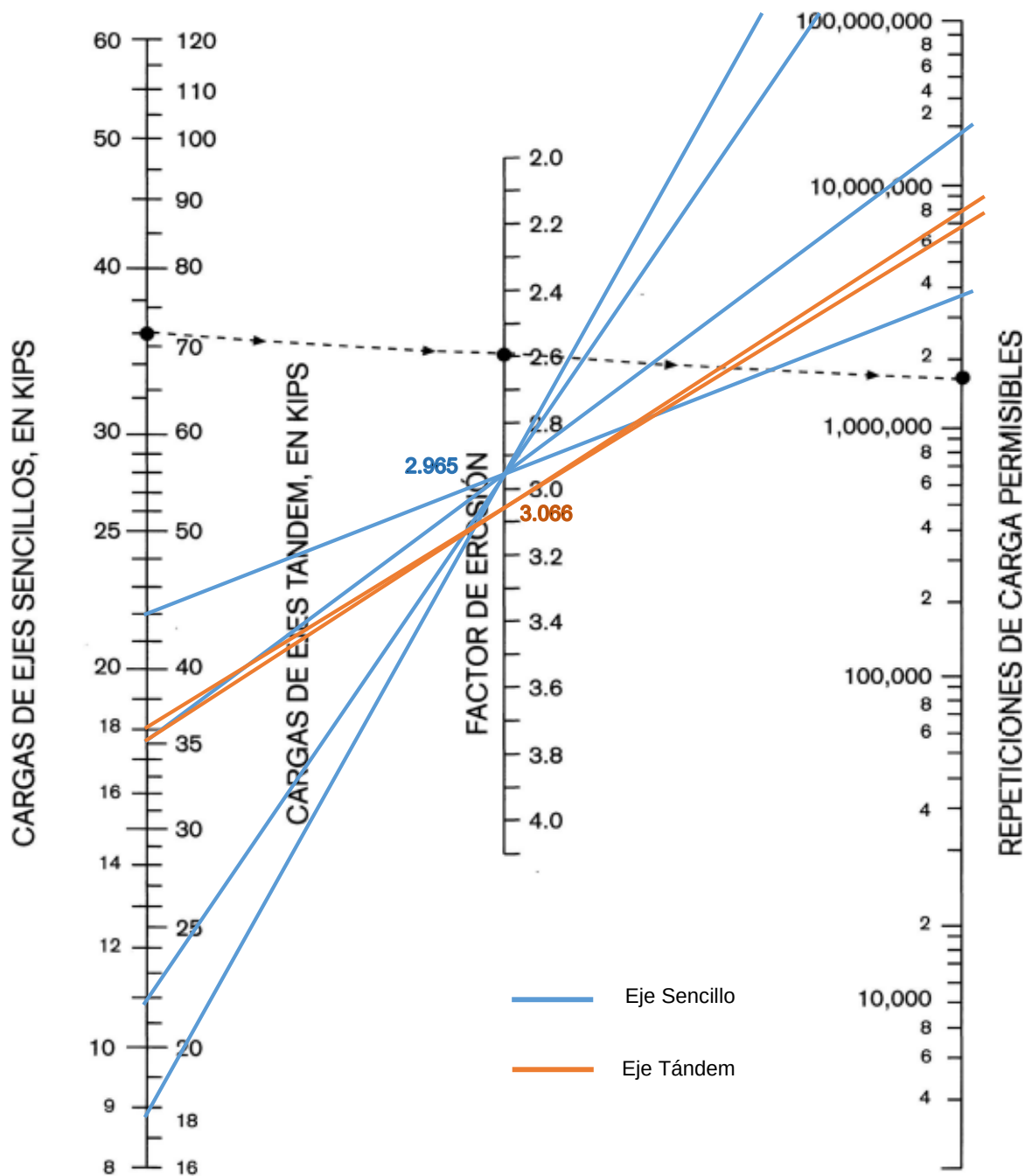
Tipo de eje	k de subrasante (pci)		
	200	246	300
Sencillo	2.97	2.965	2.96
Tándem	3.08	3.066	3.05

Fuente: Elaboración Propia

El procedimiento de cálculo es el siguiente:

- Se entra en la imagen 8 con el peso de eje ya multiplicada por su factor de seguridad.
- Esta se une con el valor de factor de erosión.
- Unir los dos puntos con una línea recta y extendiéndola hasta la escala de repeticiones permisibles.
- Si la línea no intersecta la escala de repeticiones permisibles estas repeticiones serán ilimitadas, de lo contrario se anotara el valor obtenido.
- Este mismo procedimiento se hace para todos los ejes.

Imagen 8: Nomograma para el análisis de Erosión. (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, sin apoyo lateral).



Fuente: Nomograma proporcionado por Manual de Diseño y Construcción de Pavimento CEMEX, página 60. Trazado, Elaboración Propia.

4.7.2 Daño por erosión

El daño por erosión se calcula expresando como porcentaje la relación entre las repeticiones esperadas y las repeticiones permisibles por cien. Su ecuación es:

$$\% \text{ de daño por erosión} = \frac{\text{Repeticiones esperadas}}{\text{Repeticiones permisibles}} * 100 \quad (\text{Ecuación 36})$$

Ejemplo de cálculo para eje sencillo de 17.6 Kips:

Para el eje de 17.6 Kips las repeticiones permisibles es igual a 18,000,000 y las repeticiones esperadas son 169,474, el porcentaje de daño es igual a:

$$\% \text{ de daño por fatiga} = \frac{\text{Repeticiones esperadas}}{\text{Repeticiones permisibles}} * 100 = \frac{169,474}{18,000,000} * 100 = 0.94 \%$$

De igual manera se calculan todos los porcentajes de daño para erosión para cada tipo y peso de eje.

4.8 Cálculo de espesor de losa de concreto

Para este proceso se evalúa un espesor de losa propuesto de tal manera que, los daños por fatiga y erosión sean lo más cercanos a 100% sin exceder este límite.

Conociendo las repeticiones permisibles y repeticiones esperadas por cada peso y tipo de eje se calcula el porcentaje de daño que provoca los ejes sencillos y tandem introduciendo la sumatoria de estos daños en un formato definido.

A continuación se presenta el cálculo de daño por fatiga y erosión de una losa con un espesor propuesto de 7 pulgadas con una subbase de 6 pulgadas:

Tabla 53: Cálculo del espesor de losa de concreto de 7 pulgadas

Proyecto: Diseño de pavimento rígido Cuajachillo # 1 - Nejapa

Espesor Inicial:	<u>7</u>	Pasajuntas:	SI	<u>✓</u>	NO	<u> </u>
Módulo de Reacción K de la Subrasante:	<u>246</u>	Apoyo Lateral:	SI	<u> </u>	NO	<u>✓</u>
Módulo de Ruptura, MR:	<u>652.5</u>	Período de Diseño (Años):		<u>20</u>		
Factor de Seguridad, LSF:	<u>1</u>	Base Granular:		<u>6"</u>		

Carga de eje en Kips	Multiplicada por LSF	Repeticiones Esperadas	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
			Repeticiones Permisibles	% de Fatiga	Repeticiones Permisibles	% de Daño
1	2	3	4	5	6	7

8. Esfuerzo Equivalente	<u>283</u>	10. Factor de Erosión	<u>2.965</u>
9. Factor de Relación de Esfuerzo	<u>0.43</u>		

Eje Sencillos

8.8	8.8	251,643	Ilimitado	0	Ilimitado	0
11	11	154,069	Ilimitado	0	Ilimitado	0
17.6	17.6	169,474	Ilimitado	0	18,000,000	0.94
22	22	128,390	180,000	71.33	3,700,000	3.47
Sub Total de Ejes Sencillos				71.33		4.41

11. Esfuerzo Equivalente	<u>234</u>	13. Factor de Erosión	<u>3.066</u>
12. Factor de Relación de Esfuerzo	<u>0.36</u>		

Eje Tandem

35.2	35.2	20,544	Ilimitado	0	7,800,000	0.26
36.3	36.3	15,407	Ilimitado	0	6,800,000	0.23
Sub Total de Ejes Tandem				0		0.49

% Total Fatiga:	71.33	% Total Erosión:	4.90
-----------------	--------------	------------------	-------------

Fuente: Cálculos, elaboración propia.

Formato: Manual de diseño y construcción de pavimento, Cemex.

Según los cálculos de los porcentajes de fatiga y de erosión, el espesor propuesto no exceden el 100% por lo tanto es satisfactorio. Se realizaron los cálculos para un espesor de 6.5 pulgadas dando como resultados valores mayores al 100% y para 7.5 pulgadas fueron cercanos al cero por ciento.

En el anexo, de la página XV a la página XXIV, se muestran resumidos los cálculos para los espesores de 6.5 pulgadas y 7.5 pulgadas.

La sección transversal típica de la vía se presenta en anexo, imagen 17, página XXVI.

4.9 Modulaci3n de losa

La modulaci3n de losa se refiere a definir la forma que tendr3n los tableros de losas del pavimento. Esta forma se da en base a las dimensiones de tableros, o dicho de otra manera, a la separaci3n entre juntas transversales como longitudinales.

La modulaci3n de losa va a estar regida por la separaci3n de las juntas transversales que a su vez depende del espesor del pavimento. Seg3n el Manual de Dise1o de Pavimentos de la Cemex, en la p3gina 85, existe una regla pr3ctica que nos permite dimensionar los tableros de losa para inducir el agrietamiento controlado bajo sus cortes, sin necesidad de colocar acero de refuerzo continuo:

$$S_{JT} = (21 \text{ a } 24) * D \quad (\text{Ecuaci3n 37})$$

Donde:

S_{JT} = Separaci3n de juntas transversales. ($\leq 5 \text{ m}$)

D = Espesor del pavimento. (0.178m)

El valor de 24 se utiliza cuando la fricci3n entre la subbase y el pavimento corresponde a valores normales, como en los casos de subbase granulares.

La separaci3n de juntas transversales que arroja esta f3rmula no debe ser mayor de 5 m, en tal caso deber3 limitarse a este valor.

El material de banco resulto ser seg3n el C.B.R. de 56.4 material para subbase y su clasificaci3n general fue granular, por lo tanto se utilizar3 el valor de 24 en la ecuaci3n. A continuaci3n se presenta el c3lculo de separaci3n de las juntas transversales:

C3lculo de separaci3n de juntas transversales:

Espesor de pavimento = 0.178m

$$S_{JT} = 24 * (0.178 \text{ m}) = 4.27 \text{ m}$$

Al ser S_{JT} menor de 5 metros se acepta el valor de 4.27 metros. Pero para facilitar la ubicación de los cortes en el proceso constructivos de las juntas transversales se considerará una longitud de separación de 4 metros.

La otra dimensión que tiene que ver con la modulación de losas es la separación de juntas longitudinales cuyo valor debe estar entre 3 m y 4.5 m, teniendo en cuenta que la relación entre largo y ancho de un tablero de losas no deberá estar afuera de los límites $0.71 \leq L/A \leq 1.4$.

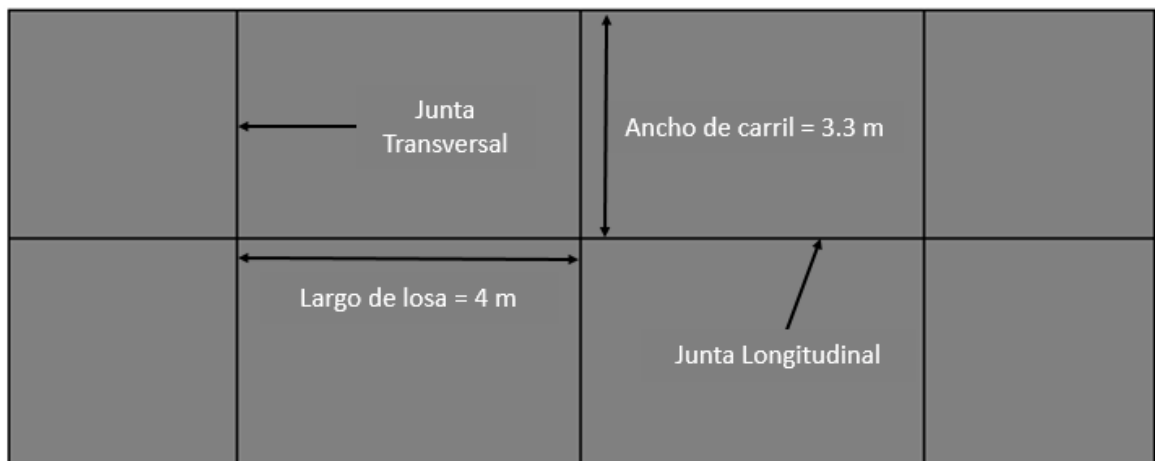
En el capítulo de estudio de tránsito, página 35, la carretera se clasifico como una Colectora Rural (CR), y según esta el ancho de carril es de 3.3 metros. Por lo tanto, la relación largo y ancho es:

$$\frac{4 \text{ m}}{3.3 \text{ m}} = 1.21$$

El resultado se encuentra entre los límites establecidos por lo que el ancho de carril se acepta.

En la siguiente gráfica se muestran las dimensiones que tendrá la losa de concreto:

Imagen 9: Dimensiones de losa de concreto



Fuente: Elaboración Propia

4.10 Barras pasajuntas y barras de amarre

4.10.1 Barras pasajuntas

Las pasajuntas se usan en las juntas transversales para transferir las cargas a las losa adyacentes.

El Tamaño de las pasajuntas depende del espesor de la losa. Su uso puede minimizar las fallas de bombeo y de diferencia de elevación de juntas.

El esfuerzo y la deflexión en las juntas son mucho más pequeñas cuando las cargas son soportadas por dos losas.

El Manual de Diseño de Pavimento de la Cemex recomienda las siguientes dimensiones de pasajuntas según el espesor de losa:

Tabla 54: Diámetro y longitudes recomendadas para pasajuntas

Espesor de Losa		Barras Pasajuntas					
		Diámetro		Longitud		Separación	
mm	in	mm	in	cm	in	cm	in
13 a 15	5 a 6	19	3/4	41	16	30	12
15 a 20	6 a 8	25	1	46	18	30	12
20 a 30	8 a 12	32	1 1/4	46	18	30	12
30 a 43	12 a 17	38	1 1/2	51	20	38	15
43 a 50	17 a 20	45	1 3/4	56	22	46	18

Fuente: Manual de Diseño de Pavimento, Cemex, pagina 79.

En la tabla se observa que, al ser de 7 pulgadas el espesor de la losa se recomienda utilizar una barra de 1 pulgadas con longitud de 46 cm (18") y una separación entre ellas de 30 cm (12").

En anexo, imagen 16, página XXV se presenta un gráfico detallando la posición de las barras en la losa de concreto.

4.10.2 Barras de amarre

Las barras de amarre se colocan a lo largo de la junta longitudinal para amarrar dos losas, con la finalidad de que se mantengan juntas y asegurar que la carga se transfiera a través de la junta.

La cantidad de acero requerido para las barras de amarre se determina de la siguiente manera:

$$A_s = \frac{\gamma_c * h * L' * f_a}{f_s} \quad (\text{Ecuación 38})$$

Donde:

A_s = Área requerida de acero por unidad de longitud de losa.

γ_c = Peso volumétrico del concreto (2,400 kg/m³ = 0.0869 pci).

h = Espesor del pavimento (7 pulg).

f_a = Coeficiente de fricción entre la losa y el terreno de soporte, que normalmente se considera de 1.5.

f_s = Esfuerzo permisible del acero (40,000 psi).

L' = Distancia desde la junta longitudinal hasta el borde libre donde no existe barra de amarre. Para autopistas de 2 a 3 carriles, L' es el ancho del carril. (Ancho de carril = 3.3 m = 129.92 pulg)

La longitud de la barra de amarre está determinada por el esfuerzo de adhesión permitido. Este esfuerzo para barras corrugadas, se puede asumir en 350 psi. La longitud de la barra, se debe basar en su resistencia total.

Su ecuación simplificada es la siguiente:

$$t = \frac{1}{2} \left(\frac{f_s * d}{\mu} \right) \quad (\text{Ecuación 39})$$

Donde:

μ = Esfuerzo permisible (350 psi).

D = Diámetro de la barra.

La longitud “t” se debe incrementar en 3 pulgadas por desalineamiento.

Cálculo del acero de acero requerido para barra de amarre:

$$A_s = \frac{\gamma_c * h * L' * f_a}{f_s} = \frac{0.0869 \frac{lb/pulg^2}{pulg} * 7 pulg * 129.92 pulg * 1.5}{40,000 \frac{lb}{pulg^2}} = 0.00296 \frac{pulg^2}{pulg}$$

Al utilizar barra de ½ pulgada con área de 0.20 pulg² se obtiene la siguiente separación:

$$Separación = \frac{0.20 pulg^2}{0.00296 \frac{pulg^2}{pulg}} = 67.6 pulg = 1717 mm = 1.72 m$$

Longitud de barra:

$$t = \frac{1}{2} \left(\frac{f_s * d}{\mu} \right) = \frac{1}{2} \left(\frac{40,000 lb/pulg^2 * 0.5 pulg}{350 lb/pulg^2} \right) = 28.57 pulg + 3 pulg = 31.57 pulg = 80 cm$$

Se usará barra de ½ pulgada con una longitud de 80 cm separadas 1.72 metros.

En anexo, imagen 16, página XXV se presenta un gráfico detallando la posición de las barras en la losa de concreto.

4.11 Diseño de junta

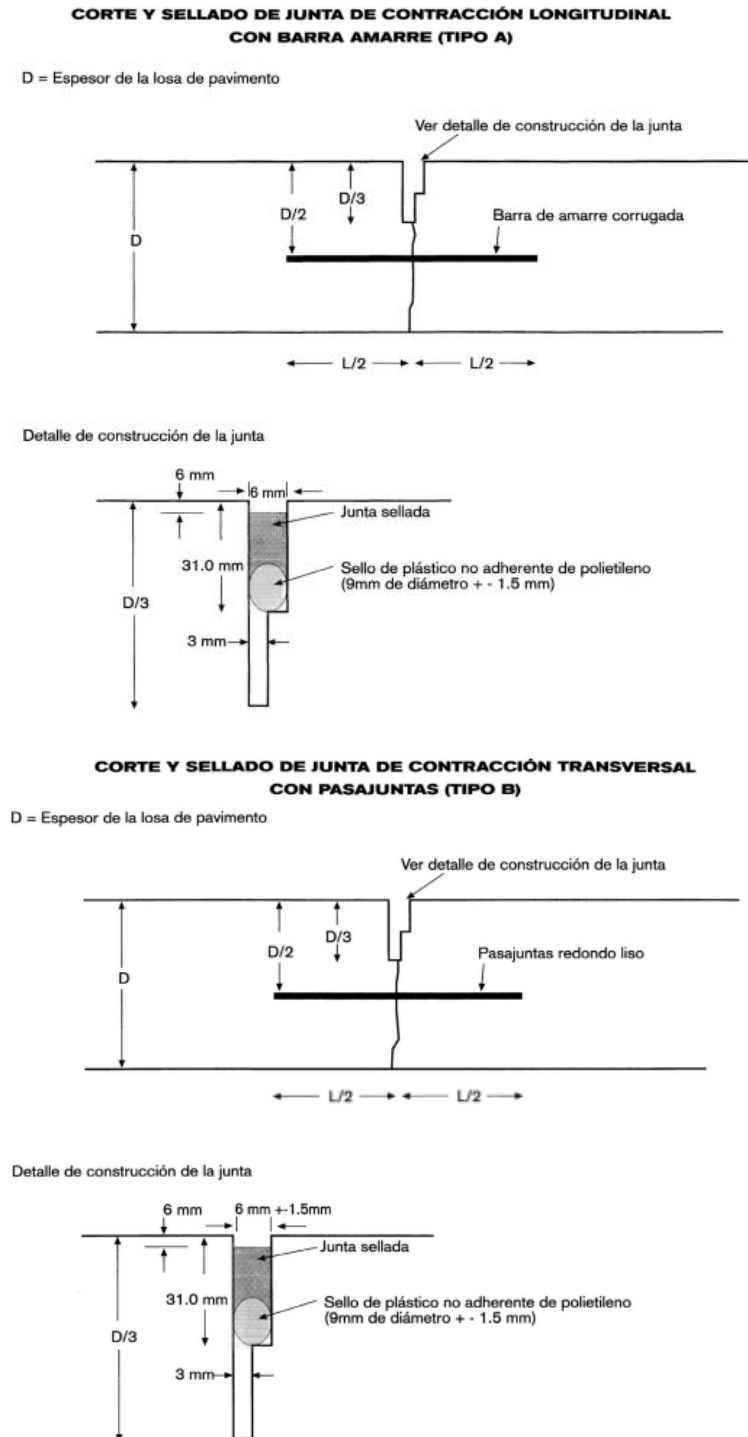
El diseño de juntas en los pavimentos de concreto es el responsable del control del agrietamiento, así como de mantener la capacidad estructural del pavimento y su calidad de servicio en los más altos niveles al menor costo anual.

Además las juntas tienen funciones más específicas:

- El control del agrietamiento transversal y longitudinal provocado por las restricciones de contracción, combinándose con los efectos de pandeo o alabeo de las losas, así como las cargas del tráfico.
- Dividir el pavimento en incrementos prácticos para la construcción.
- Absorber los esfuerzos provocados por los movimientos de las losas.
- Darle forma al depósito para el sellado de junta.

El Manual de Diseño y Construcción de Pavimentos de la Cemex considera las siguientes dimensiones para la construcción de juntas:

Imagen 10: Corte y sellado de junta



Fuente: Manual de Diseño y Construcción de Pavimentos, Cemex, Pagina 144 y 145.

Cálculos de las dimensiones de juntas:

Espesor de losa de pavimento = 7 pulg = 178 mm

$$\text{Profundidad de corte} = \frac{D}{3} = \frac{178 \text{ cm}}{3} = 5.92 \text{ cm} = 59.2 \text{ mm} \approx 60 \text{ mm}$$

En la imagen 10 se observa los detalles de construcción de la junta con las siguientes dimensiones:

$$\text{Ancho mínimo de corte} = \frac{1}{8} \text{ pulg} = 3 \text{ mm}$$

$$\text{Ancho del corte de sellado} = 6 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor libre de la junta} = 6 \text{ mm}$$

$$\text{Prof. junta sellada} = 31 \text{ mm} - \text{Espesor libre} - \text{Diámetro sello polietileno}$$

$$\text{Profundidad de junta sellada} = 31 \text{ mm} - 6 \text{ mm} - 9 \text{ mm} = 16 \text{ mm}$$

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES



CONCLUSIONES

De acuerdo con los resultados obtenidos de los distintos estudios realizados al tramo de camino Cuajachillo # 1 – Nejapa, se concluye que:

Estudios de tránsito

- Se realizó conteo vehicular con duración de 12 horas durante tres días consecutivos, con el fin de conocer el volumen de vehículos que circula por la vía y determinar el TPDA₂₀₂₁, dando este último como resultado 650 vpd, valor obtenido usando los factores de expansión de la estación de Mayor Cobertura N° 200 Entrada al INCAE - El cruce.
- Se determinó el total de repeticiones esperadas por tipo y peso de eje, el cual fue de 3,533,270 para un periodo de diseño de 20 años. Este periodo de diseño se obtuvo de la clasificación funcional de la carretera que de acuerdo con esta investigación es una Colectora Rural (CR), ya que el TPDA₂₀₄₁ es de 1,356 Veh/Día, valor que se encuentra entre los intervalos 500 y 3,000 vehículos promedio diario.

Estudios de suelo

- Los suelos encontrados a lo largo de la vía en estudio, según la norma ASTM D-3282 tienen clasificación: A-1-b (0), A-2-4 (0) y A-6 (2). Se realizaron los ensayos de CBR a los suelos con clasificación A-2-4 (0) y A-6 (2), dando como resultado valores entre 16.8% y 10%, pero al realizar el cálculo del CBR de diseño dio como resultado un valor de 12.8 y según la norma NIC 2019 no cumplen con el valor mínimo requerido, debido a que no debe ser menor al 15%.
- Como los suelos a lo largo de la vía no cumplen con el valor de CBR mínimo, se hará uso del material del banco Miraflores que posee un CBR de 56.4%, siendo superior al establecido por la norma NIC 2019 y según los requerimientos de granulometría este material cumple con las especificaciones para ser utilizada como subbase tipo B.

Estructura de pavimento rígido

- Haciendo uso de las tablas de esfuerzo equivalente, factores de erosión y de los nomogramas establecidos por la PCA, se calculó el espesor de losa adecuado dando como resultado 7 pulgadas con una subbase de 6 pulgadas, ya que el porcentaje de fatiga es de 71.33% y de erosión es de 4.90% y ambos no exceden el límite del 100%. Al utilizar un espesor de 6.5 pulgada los resultados fueron mayores al cien por ciento y para 7.5 pulgadas fueron cercanos al cero por ciento.
- Las losas tendrán dimensiones de 4 metros de separación en las juntas transversales y de 3.3 m en las juntas longitudinales. Las barras pasajuntas tendrán dimensiones de 1 pulgada de diámetro con una longitud de 46 cm y una separación de 30 cm y las barras de amarre tendrán dimensiones de $\frac{1}{2}$ pulgada de diámetro con una longitud de 80 cm y una separación de 1.72 metros.

RECOMENDACIONES

- Debido a su clasificación funcional la vía contará con 2 carriles, uno en cada sentido. El ancho de cada carril será de 3.3 metros.
- El material a utilizar como subbase según la NIC 2019 deberá ser de partículas o fragmentos, durables de piedra, escoria o grava triturados, el cual será tomado del Banco Miraflores con clasificación A-1-a (0).
- De acuerdo con la NIC 2019 el material de subbase deberá tener un 0% de contenido de materia orgánica.
- Para la estructura de pavimento, la resistencia a la flexotracción del concreto utilizado para la construcción de la losa deberá ser a los 28 días de 4.5 Mpa (652.5 psi) como mínimo.
- En la estructura de pavimento las barras pasajuntas (junta transversal) deberán ser lisas, mientras que la barras de amarre (junta longitudinal) deberán ser corrugadas, ambos tipos de barra con un límite de fluencia mínimo de 40,000 psi.

BIBLIOGRAFIA

- Banco Central de Nicaragua. (2020). Anuario de Estadísticas Macroeconómicas.
- Cal y Mayor Reyes, S., R., Cárdenas Grisales, J. (2018). Ingeniería de tránsito. Fundamentos y aplicaciones. 9na Edición. México. Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.
- Cemex. Manual de Diseño y Construcción de Pavimentos.
- Coronado Iturbide, J. (2002). Manual Centroamericano para Diseño de Pavimento.
- Leclair, R. (2004). Manual Centroamericano de Normas para el Diseño Geométrico de las Carreteras Regionales. SIECA 2^{da} Edición.
- Ministerio de Energía Y Minas. (2019). Anuario Estadístico de Hidrocarburos.
- Ministerio de Transporte e Infraestructura. (2020). Anuario de Aforos de Tráfico.
- Ministerio de Transporte e Infraestructura. (2008) Manual para la Revisión de Estudios Geotécnicos.
- Ministerio de Transporte e Infraestructura. (2019). Especificaciones Generales para la Construcción de Caminos, Calles y Puentes. Tomo II y II.
- Muni Budhu. Soil Mechanics and foundations. 3^a Edición.
- Universidad Nacional de Ingeniería (UNI). (2019). Guía de Mecánica de Suelos I.

ANEXOS

Tabla 55: Resumen de conteo vehicular de 12 horas por tipo de vehículos en ambos sentidos del día Martes

Hora	Motos	Vehículos de Pasajeros						Vehículos de Carga				Equipo Pesado	TOTAL (Veh/12hr)
		Autos	Jeep	Camionetas	McBus <15 s.	MnBus 15-30 s.	Bus 30+ s.	Liv. 2-5 t	C2 5 + t	C3	T3 - S2	Otros	
6:00 - 7:00	38	22	5	14	1	1	0	1	1	0	0	5	88
7:00 - 8:00	25	13	8	15	2	0	0	3	3	0	0	2	71
8:00 - 9:00	22	7	3	7	2	0	0	1	2	0	0	1	45
9:00 - 10:00	13	3	1	4	0	0	2	1	2	0	0	4	30
10:00 - 11:00	13	2	0	1	2	0	0	1	1	0	0	1	21
11:00 - 12:00	13	10	0	3	2	0	0	1	2	0	0	4	35
12:00 - 1:00	17	10	4	9	1	1	0	0	0	0	0	2	44
1:00 - 2:00	7	1	0	3	1	0	0	1	3	0	0	1	17
2:00 - 3:00	8	5	1	4	0	1	0	0	2	0	0	0	21
3:00 - 4:00	19	7	1	3	2	1	0	2	1	1	0	1	38
4:00 - 5:00	25	8	0	4	1	0	0	3	3	2	0	2	48
5:00 - 6:00	30	12	2	9	2	0	0	3	3	0	0	4	65
SUMA TIPO VEHICULO	230	100	25	76	16	4	2	17	23	3	0	27	523

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 56: Resumen de conteo vehicular de 12 horas por tipo de vehículos en ambos sentidos del día Miércoles

Hora	Motos	Vehículos de Pasajeros						Vehículos de Carga				Equipo Pesado	TOTAL (Veh/12hr)
		Autos	Jeep	Camionetas	McBus <15 s.	MnBus 15-30 s.	Bus 30+ s.	Liv. 2-5 t	C2 5 + t	C3	T3 - S2	Otros	
6:00 - 7:00	31	16	3	5	1	1	1	1	1	0	0	3	63
7:00 - 8:00	40	16	3	28	2	0	0	7	6	2	0	1	105
8:00 - 9:00	24	3	2	11	1	0	0	3	3	0	0	2	49
9:00 - 10:00	12	6	5	4	0	0	0	3	0	0	0	4	34
10:00 - 11:00	11	6	3	2	0	0	0	2	0	0	0	2	26
11:00 - 12:00	21	17	2	10	2	0	0	1	0	0	0	4	57
12:00 - 1:00	8	16	2	11	0	1	0	0	4	0	0	1	43
1:00 - 2:00	21	1	1	6	1	0	0	1	1	0	0	2	34
2:00 - 3:00	12	4	2	7	0	0	0	3	1	0	0	1	30
3:00 - 4:00	13	5	1	3	2	0	0	2	2	0	1	1	30
4:00 - 5:00	20	10	1	3	0	0	0	1	3	0	0	0	38
5:00 - 6:00	30	10	2	7	3	0	1	6	3	0	0	0	62
SUMA TIPO VEHICULO	243	110	27	97	12	2	2	30	24	2	1	21	571

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 57: Resumen de conteo vehicular de 12 horas por tipo de vehículos en ambos sentidos del día Jueves

Hora	Motos	Vehículos de Pasajeros						Vehículos de Carga				Equipo Pesado	TOTAL (Veh/12hr)
		Autos	Jeep	Camionetas	McBus <15 s.	MnBus 15-30 s.	Bus 30+ s.	Liv. 2-5 t	C2 5 + t	C3	T3 - S2	Otros	
6:00 - 7:00	32	16	3	5	1	1	0	0	4	0	0	3	65
7:00 - 8:00	38	14	4	19	1	0	0	5	1	0	0	0	82
8:00 - 9:00	13	8	4	8	1	0	0	0	1	0	0	2	37
9:00 - 10:00	9	9	0	6	0	0	0	2	0	0	0	2	28
10:00 - 11:00	11	7	0	4	0	0	0	3	0	0	0	1	26
11:00 - 12:00	9	8	0	4	2	0	0	0	3	0	0	1	27
12:00 - 1:00	19	13	3	7	0	1	0	3	1	0	0	0	47
1:00 - 2:00	12	7	1	4	3	1	1	3	1	0	0	3	36
2:00 - 3:00	11	3	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	18
3:00 - 4:00	16	9	2	6	1	1	0	3	1	0	0	1	40
4:00 - 5:00	22	8	3	3	1	0	0	4	1	0	1	1	44
5:00 - 6:00	42	15	2	12	2	0	0	3	0	0	0	0	76
SUMA TIPO VEHICULO	234	117	22	81	13	4	1	26	13	0	1	14	526

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 58: Peso de eje para vehículos de pasajeros

CARGA MOVILES: Para efectos de diseño de estructuras de pavimento de acuerdo a resultados de estudios de tráfico, laboratorios de suelos, muestreos, conteo vehicular y cálculos relacionados, se han identificado que los daños que causa los vehículos livianos a la estructura del pavimento en carreteras nuevas, producto de su desplazamiento sobre la vía, es mínimo a razón de 1 en 50,000 respecto a vehículos pesados, por tal motivo no figura en el diagrama de cargas permisibles de nuestro país, información referida al respecto.

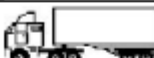
Para efectos de estimaciones de cargas, seguimiento estadístico, control de tráfico y diseño de vehículos se pueden considerar los siguientes pesos por ejes.

Tipo de Vehículo	Peso por eje en TON	Peso por eje en Lbs
AUTOMOVIL	1/1	2200/2200
JEEP	1/1	2200/2200
CAMIONETA	1/2	2200/4400
MC-15	2/4	4400/8800
MC-12-30	4/8	8800/17600
C2-LIV	4/8	8800/17600

Fuente: Departamento de Peso y Dimensiones, Dirección General de Vialidad, Ministerio de Transporte e Infraestructura, MTI.

Tabla 59: Diagrama de cargas permisibles

PESOS MAXIMOS PERMISIBLES POR TIPO DE VEHICULOS

TIPO DE VEHICULOS	ESQUEMAS DE VEHICULOS	PESO MAXIMO AUTORIZADO						Peso Máximo Total (1) Ton - Met.
		1er. Eje	2do. Eje	3er. Eje	4to. Eje	5to. Eje	6to. Eje	
C2		5.00	10.00					15.00
C3		5.00	16.50					21.50
			8.25	8.25				
C4		5.00	20.00					25.00
			6.67	6.66	6.66			
T2-S1		5.00	9.00	9.00				23.00
T2-S2		5.00	9.00	16.00				30.00
				8.00	8.00			
T2-S3		5.00	9.00	20.00				34.00
				6.67	6.66	6.66		
T3-S1		5.00	16.00		9.00			30.00
			8.00	8.00				
T3-S2		5.00	16.00		16.00			37.00
			8.00	8.00	8.00	8.00		
T3-S3		5.00	16.00		20.00			41.00
			8.00	8.00	6.67	6.66	6.66	
C2-R2		4.50	9.00	4.0 a	4.0 a			21.50
		4.50	9.00	6.5 b	6.5 b			26.50
C3-R2		5.00	16.00		4.0 a	4.0 a		29.00
		5.00	8.00	8.00	6.5 b	6.5 b		34.00
C3-R3		5.00	16.00		4.0 a	5.0 a	5.0 a	35.00
		5.00	8.0 b	8.0 b	6.5 b	5.0 b	5.0 b	37.50

NOTA: El peso máximo permisible será el menor entre el especificado por el fabricante y el contenido en esta columna.

a : Eje sencillo llanta sencilla.
b : Eje sencillo llanta doble.

Fuente: Departamento de Peso y Dimensiones, Dirección General de Vialidad, Ministerio de Transporte e Infraestructura, MTI.

Tabla 60: Resumen de resultados de ensayos en muestras de sondeos de línea

Estación (m)	Lado	Sondeo No.	Muestra No.	Profundidad (cm)	Porcentaje que pasa por tamices						Limite %		Clasificación HRB	Humedad Natural (%)	C.B.R. a Compact.			Observación
					1/2"	3/8"	4	10	40	200	LL	IP			90%	95%	100%	
0+000	Derecha	1	1	0 - 150	100	99	98	73	37	21	35	7	A-2-4 (0)	17.64	8.5	16.8	25.1	Arena limosa, color café oscuro
0+250	Izquierda	2	1	0 - 40	100	99	97	79	52	39	39.4	16.5	A-6 (2)	6.14	-	-	-	Limo arcillo arenoso, color café claro
0+250	Izquierda	2	2	40 - 80	100	99	96	69	35	14	38	4	A-2-4 (0)	6.57	-	-	-	Arena limosa, color café claro
0+250	Izquierda	2	3	80 - 150	100	99	98	66	28	5	-	NP	A-1-b (0)	7.81	-	-	-	Arena
0+500	Derecha	3	1	0 - 100	100	98	93	66	30	13	40	6	A-2-4 (0)	13.42	7.6	14.6	21.7	Arena limosa, color café oscuro
0+500	Derecha	3	2	100 - 150	100	99	97	88	58	43	31	13.9	A-6 (2)	9.29	3	10	17.9	Limo arcillo arenoso, color café oscuro
0+750	Izquierda	4	1	0 - 150	100	100	97	84	33	17	23	3	A-2-4 (0)	11.11	-	-	-	Arena limosa, color oscuro
1+000	Derecha	5	1	0 - 150	100	100	99	79	29	13	-	NP	A-1-b (0)	4.71	-	-	-	Arena

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 61: Resultado de prueba de C.B.R. para suelo A-2-4 (0) de la estación 0+000 m

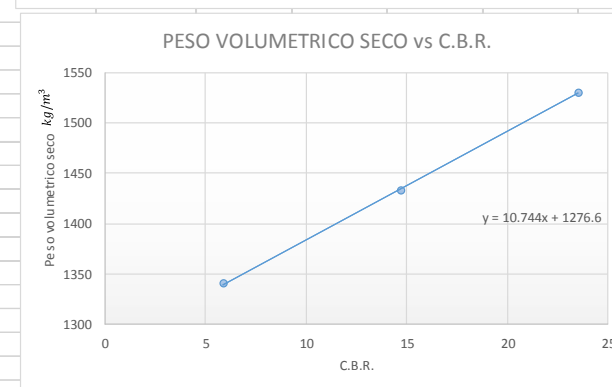
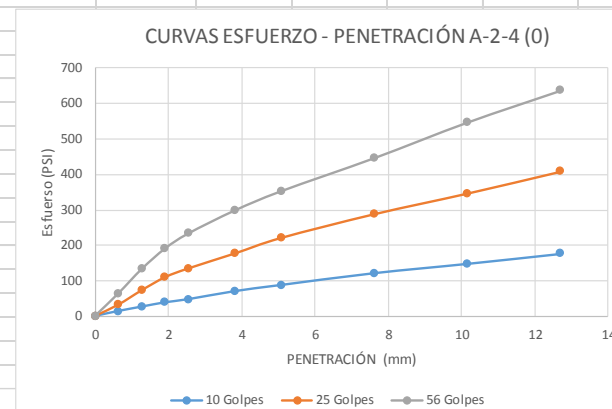
Densidad Seca Máxima (Kg/m³)	1521.77		1521.77		1521.77				Factor Hinchamiento	0.01		
Humedad Optima (%)	20.68		20.68		20.68				Fcator de lectura (lb)	52.95		
Humedad actual de material (%)	0		0		0				Area del piston (Pulg2)	3		
Molde N°	A-1		A-4		A-5							
Peso del molde (gr)	7112		7145		7156							
Altura libre de molde (cm)	11.64		11.64		11.64							
Diametro interior (cm)	15.24		15.24		15.24							
Vol. Cilindro (cm³)	2123		2123		2123							
Tara N°	PI-03		A-091		A-211							
Peso tara (gr)	48.4		41.2		29.1							
Peso humedo + tara (gr)	165.6		171.4		130.9							
Peso seco + tara (gr)	146.6		149.3		113.3							
HUMEDAD REPRODUCIDA (%)	19.35		20.44		20.90							
Número de golpes por capa	10		25		56							
Peso material humedo + molde (gr)	10509		10828		11070							
PESO VOLUMETRICO HUMEDO (Kg/m³)	1600		1734.6		1843.4							
PESO VOLUMETRICO SECO (Kg/m³)	1340.5		1440.1		1524.7							
COMPACTACION REPRODUCIDA	88.1		94.6		100.2							
Lectura Inicial del Extensometro	10		10		10							
Lectura Final del Extensometro	31		41		38							
HINCHAMINETO (%)	0.18		0.27		0.24							
Penetraciones (mm)	LECTURA	PSI	LECTURA	PSI	LECTURA	PSI						
0	0	0.00	0	0.00	0	0.00						
0.635	1	17.65	2	35.30	5.4	95.31						
1.27	1.8	31.77	5	88.25	8.8	155.32						
1.91	2.5	44.13	7	123.55	11.8	208.27						
2.54	3.1	54.72	9	158.85	14.5	255.93						
3.81	4.5	79.43	11	194.15	18.4	324.76						
5.08	5.8	102.37	13	229.45	21	370.65						
7.62	8.2	144.73	16	282.40	26	458.90						
10.16	9.9	174.74	18	317.70	31.6	557.74						
12.7	12.3	217.10	21	370.65	37	653.05						
CBR 2.54 mm (0.1")	5.5		15.9		25.6							
CBR 5.08 mm (0.2")	6.8		15.3		24.7							

<

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 62: Resultado de prueba de C.B.R. para suelo A-2-4 (0) de la estación 0+500 m

Densidad Seca Máxima (kg/m^3)	1509.78		1509.78		1509.78				Factor Hinchamiento	0.01		
Humedad Óptima (%)	17.45		17.45		17.45				Fcator de lectura (lb)	52.95		
Humedad actual de material (%)	0		0		0				Area del piston (Pulg2)	3		
Molde N°	A-5		A-8		A-1							
Peso del molde (gr)	7155		7132		7112							
Altura libre de molde (cm)	11.64		11.64		11.64							
Diametro interior (cm)	15.24		15.24		15.24							
Vol. Cilindro (cm^3)	2123		2123		2123							
Tara N°	K-30		A-12		A-16							
Peso tara (gr)	41.5		41.8		42.3							
Peso humedo + tara (gr)	145.3		143.2		143.9							
Peso seco + tara (gr)	130.7		128.5		128.7							
HUMEDAD REPRODUCIDA (%)	16.37		16.96		17.59							
Número de golpes por capa	10		25		56							
Peso material humedo + molde (gr)	10468		10690		10932							
PESO VOLUMETRICO HUMEDO (kg/m^3)	1560.3		1675.7		1799.1							
PESO VOLUMETRICO SECO (kg/m^3)	1340.8		1432.8		1529.9							
COMPACTACION REPRODUCIDA	88.8		94.9		101.3							
Lectura Inicial del Extensometro	10		10		10							
Lectura Final del Extensometro	25		29		32							
HINCHAMINETO (%)	0.13		0.16		0.19							
Penetraciones (mm)	LECTURA	PSI	LECTURA	PSI	LECTURA	PSI						
0	0	0.00	0	0.00	0	0.00						
0.635	0.8	14.12	1.8	31.77	3.6	63.54						
1.27	1.5	26.48	4.1	72.37	7.5	132.38						
1.91	2.2	38.83	6.2	109.43	10.8	190.62						
2.54	2.7	47.66	7.6	134.14	13.2	232.98						
3.81	4	70.60	10	176.50	16.9	298.29						
5.08	5	88.25	12.5	220.63	20	353.00						
7.62	6.9	121.79	16.3	287.70	25.3	446.55						
10.16	8.4	148.26	19.6	345.94	31	547.15						
12.7	10	176.50	23.1	407.72	36.1	637.17						
CBR 2.54 mm (0.1")	4.8		13.4		23.3				C.B.R.	90%	95%	100%
CBR 5.08 mm (0.2")	5.9		14.7		23.5					7.6	14.6	21.7



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 63: Resultado de prueba de C.B.R. para suelo A-6 (2) de la estación 0+500 m

Densidad Seca Máxima (kg/m³)	1370.93		1370.93		1370.93	
Humedad Optima (%)	24.38		24.38		24.38	
Humedad actual de material (%)	0		0		0	
Molde N°	A-1		A-2		A-3	
Peso del molde (gr)	7112		7119		7080	
Altura libre de molde (cm)	11.64		11.64		11.64	
Diametro interior (cm)	15.24		15.24		15.24	
Vol. Cilindro (cm³)	2123		2123		2123	
Tara N°	A-120		E-YO		A-11	
Peso tara (gr)	47		47		41	
Peso humedo + tara (gr)	147		147		157	
Peso seco + tara (gr)	128		128		135	
HUMEDAD REPRODUCIDA (%)	23.46		23.46		23.40	
Número de golpes por capa	10		25		56	
Peso material humedo + molde (gr)	10322		10522		10706	
PESO VOLUMETRICO HUMEDO (kg/m³)	1512		1602.7		1707.7	
PESO VOLUMETRICO SECO (kg/m³)	1224.6		1298.2		1383.8	
COMPACTACION REPRODUCIDA	89.3		94.7		100.9	
Lectura Inicial del Extensometro	10		10		10	
Lectura Final del Extensometro	55		58		57	
HINCHAMINETO (%)	0.39		0.41		0.40	
Penetraciones (mm)	LECTURA	PSI	LECTURA	PSI	LECTURA	PSI
0	0	0.00	0	0.00	0	0.00
0.635	0.7	12.36	1.2	21.18	2	35.30
1.27	1	17.65	2	35.30	4.6	81.19
1.91	1.4	24.71	3	52.95	7.4	130.61
2.54	1.6	28.24	4.1	72.37	9.5	167.68
3.81	1.8	31.77	5.9	104.14	12.6	222.39
5.08	2.3	40.60	7.3	128.85	16	282.40
7.62	2.6	45.89	9.6	169.44	22.1	390.07
10.16	3	52.95	11.7	206.51	27.4	483.61
12.7	3.4	60.01	13.6	240.04	32	564.80
CBR 2.54 mm (0.1")	2.8		7.2		16.8	
CBR 5.08 mm (0.2")	2.7		8.6		18.8	

Factor Hinchamiento	0.01
Fcator de lectura (lb)	52.95
Area del piston (Pulg2)	3

CURVAS ESFUERZO - PENETRACIÓN A-6 (2)

—●— 10 Golpes —●— 25 Golpes —●— 56 Golpes

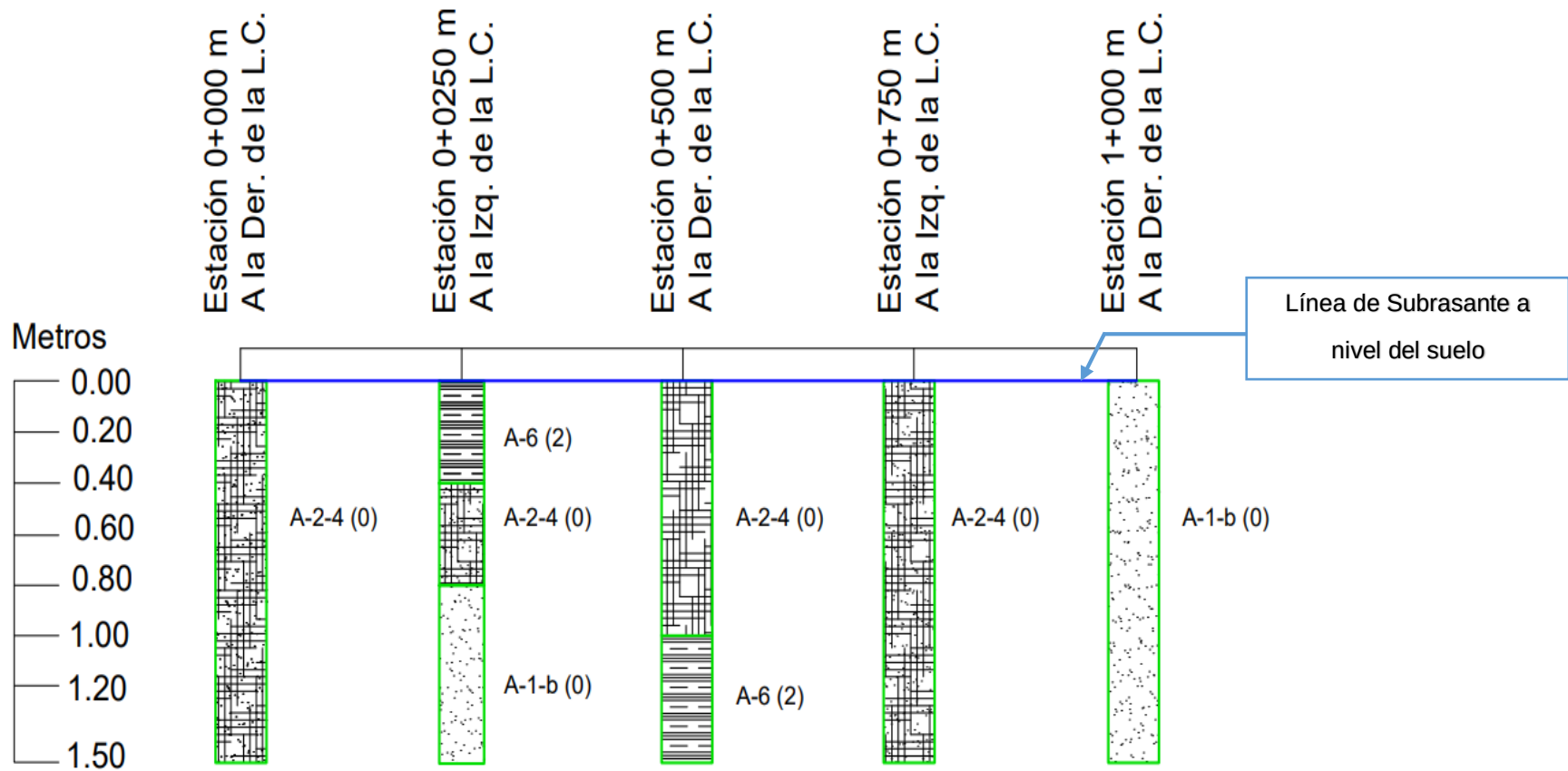
PESO VOLUMETRICO SECO vs C.B.R.

$y = 9.7234x + 1204.6$

C.B.R	90%	95%	100%
	3	10	17.1

Fuente: Elaboración Propia

Imagen 11: Perfil estratigráfico del tramo en estudio.



Fuente: Elaboración Propia

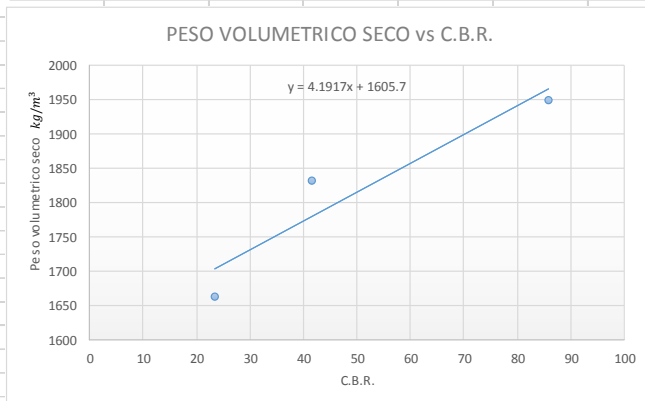
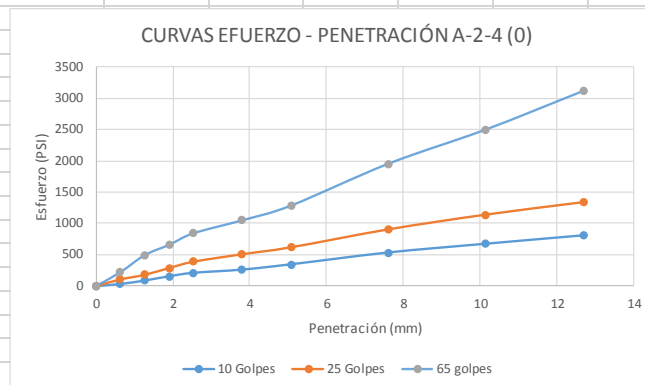
Tabla 64: Resultados de ensayos en muestra de banco de material Miraflores

MATRIZ DE ENSAYO (GRANULOMETRIA, LIMITES DE ATTERBERG, CLASIFICACIÓN Y HUMEDAD NATURAL) DEL BANCO DE MATERIAL MIRAFLORES																				
Muestra No.	Porcentaje que pasa por tamices									Limite %		Clasificación HRB	Humedad Natural (%)	PVSS (Kg/m ³)	PVSC (Kg/m ³)	Proctor Modificado (kg/m ³)	C.B.R. a Compact.			Observación
	1 1/2"	1"	3/4"	1/2"	3/8"	4"	10"	40"	200"	LL	IP						90%	95%	100%	
1	100	92	85	78	70	63	44	21	6	-	NP	A-1-a (0)	3.35	1491	1588	1939.14	33.3	56.4	79.5	Grava arenosa con limo, color gris claro

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 65: Resultado de prueba de C.B.R. para el suelo A-1-a (0) del banco de material Miraflores

Densidad Seca Máxima (Kg/m3)	1939.14		1939.14		1939.14				Factor Hinchamiento	0.01		
Humedad Optima (%)	10.15		10.15		10.15				Fcator de lectura (lb)	52.95		
Humedad actual de material (%)	0		0		0				Area del piston (Pulg2)	3		
Molde N°	A-8		A-2		A-5							
Peso del molde (gr)	7123		7067.6		7146.7							
Altura libre de molde (cm)	11.64		11.64		11.64							
Diametro interior (cm)	15.24		15.24		15.24							
Vol. Cilindro (cm ³)	2123		2123		2123							
Tara N°	B-4		CH-M		H-K							
Peso tara (gr)	27.6		41.6		41.7							
Peso humedo + tara (gr)	123.7		174.3		160.4							
Peso seco + tara (gr)	114.8		162.5		150.1							
HUMEDAD REPRODUCIDA (%)	10.21		9.76		9.50							
Número de golpes por capa	10		25		65							
Peso material humedo + molde (gr)	11019		11342		11680							
PESO VOLUMETRICO HUMEDO (kg/m ³)	1835.1		2013		2135							
PESO VOLUMETRICO SECO (kg/m ³)	1665.1		1834		1949.7							
COMPACTACION REPRODUCIDA	85.9		94.6		100.5							
Lectura Inicial del Extensometro	10		10		10							
Lectura Final del Extensometro	20		19		20							
HINCHAMINETO (%)	0.09		0.08		0.09							
Penetraciones (mm)	LECTURA	PSI	LECTURA	PSI	LECTURA	PSI						
0	0	0	0	0	0	0						
0.635	2.0	35	6.1	108	12.6	222						
1.27	5.1	90	10.3	182	28.1	496						
1.91	9.0	159	16.5	291	37.5	662						
2.54	12.1	214	22.2	392	47.9	845						
3.81	15.0	265	29.0	512	59.7	1054						
5.08	19.8	349	35.3	623	73.0	1288						
7.62	30.5	538	51.6	911	111.0	1959						
10.16	38.4	678	65.0	1147	142.0	2506						
12.7	46.0	812	76.3	1347	177.0	3124						
CBR 2.54 mm (0.1")	21.36		39.18		84.54				C.B.R.	90%	95%	100%
CBR 5.08 mm (0.2")	23.30		41.54		85.90					33.3	56.4	79.5



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 66: Esfuerzo equivalente para pavimento sin apoyo lateral

Esfuerzo Equivalente- Sin apoyo Lateral
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																				
	50			100			150			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	825	679	510	726	585	456	671	542	437	634	516	428	584	486	419	523	457	414	484	443	412
4.5	699	586	439	616	500	380	571	460	359	540	435	349	498	406	339	488	378	331	417	363	328
5.0	602	516	387	531	436	328	493	399	305	467	376	293	432	349	282	390	321	272	363	307	269
5.5	526	461	347	464	387	290	431	353	266	409	331	253	379	305	240	343	278	230	320	264	226
6.0	465	416	315	411	348	261	382	316	237	362	296	223	336	271	209	304	246	198	285	232	193
6.5	417	380	289	367	317	238	341	286	214	314	267	201	300	244	186	273	220	173	256	207	168
7.0	375	349	267	331	290	219	307	262	196	292	244	183	272	222	167	246	199	154	231	186	148
7.5	340	323	247	300	268	203	279	241	181	265	224	168	246	203	153	224	181	139	210	169	132
8.0	311	300	230	274	249	189	255	223	168	242	208	156	225	188	141	205	167	126	192	155	120
8.5	285	281	215	252	232	177	234	208	158	222	193	145	206	174	131	188	154	116	177	143	109
9.0	264	264	200	232	218	166	216	195	148	205	181	136	190	163	122	174	144	108	163	133	101
9.5	245	248	187	215	205	157	200	183	140	190	170	129	176	153	115	161	134	101	151	124	93
10.0	228	235	174	200	193	148	186	173	132	177	160	122	164	144	108	150	126	95	141	117	87
10.5	213	222	163	187	183	140	174	164	125	165	151	115	153	136	103	140	119	89	132	110	82
11.0	200	211	153	175	174	132	163	155	119	154	143	110	144	129	98	131	113	85	123	104	78
11.5	188	201	142	165	165	125	153	148	113	145	136	104	135	122	93	123	107	80	116	98	74
12.0	177	192	133	155	158	119	144	141	108	137	130	100	127	116	89	116	102	77	109	93	70
12.5	168	183	123	147	151	113	136	135	103	129	124	95	120	111	85	109	97	73	103	89	67
13.0	159	176	114	139	144	107	129	129	98	122	119	91	113	106	81	103	93	70	97	85	64
13.5	152	168	105	132	138	101	122	123	93	116	114	87	107	102	78	98	89	67	92	81	64
14.0	144	162	97	125	133	96	116	118	89	110	109	83	102	98	75	93	85	65	88	78	59

Fuente: Manual de Diseño de Pavimento, Cemex.

Tabla 67: Factores de erosión, para pavimento con pasajuntas y sin apoyo lateral

Factores de Erosión - Con Pasajuntas - Sin Apoyo Lateral
Eje Sencillo / Eje Tandem / Eje Tridem

Espesor de Losa, (pulgadas)	k de la subrasante, pci																	
	50			100			200			300			500			700		
	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri	Sen	Tán	Tri
4.0	3.74	3.83	3.89	3.73	3.79	3.82	3.72	3.75	3.75	3.71	3.73	3.70	3.70	3.70	3.61	3.68	3.67	3.53
4.5	3.59	3.70	3.78	3.57	3.65	3.69	3.56	3.61	3.62	3.55	3.58	3.57	3.54	3.55	3.50	3.52	3.53	3.44
5.0	3.45	3.58	3.68	3.43	3.52	3.58	3.42	3.48	3.50	3.41	3.45	3.46	3.40	3.42	3.40	3.38	3.40	3.34
5.5	3.33	3.47	3.59	3.31	3.41	3.49	3.29	3.36	3.40	3.28	3.33	3.36	3.27	3.30	3.30	3.26	3.28	3.25
6.0	3.22	3.38	3.51	3.19	3.31	3.40	3.18	3.26	3.31	3.17	3.23	3.26	3.15	3.20	3.21	3.14	3.17	3.16
6.5	3.11	3.29	3.44	3.09	3.22	3.33	3.07	3.16	3.23	3.06	3.13	3.18	3.05	3.10	3.12	3.03	3.07	3.08
7.0	3.02	3.21	3.37	2.99	3.14	3.26	2.97	3.08	3.16	2.96	3.05	3.10	2.95	3.01	3.04	2.94	2.98	3.00
7.5	2.93	3.14	3.31	2.71	3.06	3.20	2.88	3.00	3.09	2.87	2.97	3.03	2.86	2.93	2.97	2.84	2.90	2.93
8.0	2.85	3.07	3.26	2.82	2.99	3.14	2.80	2.93	3.03	2.79	2.89	2.97	2.77	2.85	2.90	2.76	2.82	2.86
8.5	2.77	3.01	3.20	2.74	2.93	3.09	2.72	2.86	2.97	2.71	2.82	2.91	2.69	2.78	2.84	2.68	2.75	2.79
9.0	2.70	2.96	3.15	2.67	2.87	3.04	2.65	2.80	2.92	2.63	2.76	2.86	2.62	2.71	2.78	2.61	2.68	2.73
9.5	2.63	2.90	3.11	2.60	2.81	2.99	2.58	2.74	2.87	2.56	2.70	2.81	2.55	2.65	2.73	2.54	2.62	2.68
10.0	2.56	2.85	3.06	2.54	2.76	2.94	2.51	2.68	2.83	2.50	2.64	2.76	2.48	2.59	2.68	2.47	2.56	2.63
10.5	2.50	2.81	3.02	2.47	2.71	2.90	2.45	2.63	2.78	2.44	2.59	2.72	2.42	2.54	2.64	2.41	2.51	2.58
11.0	2.44	2.76	2.98	2.42	2.67	2.86	2.39	2.58	2.74	2.38	2.54	2.68	2.36	2.49	2.59	2.35	2.45	2.54
11.5	2.38	2.72	2.94	2.36	2.62	2.82	2.33	2.54	2.70	2.32	2.49	2.64	2.30	2.44	2.55	2.29	2.40	2.50
12.0	2.33	2.68	2.91	2.30	2.58	2.79	2.28	2.49	2.67	2.26	2.44	2.60	2.25	2.39	2.51	2.23	2.36	2.46
12.5	2.28	2.64	2.87	2.25	2.54	2.75	2.23	2.45	2.63	2.21	2.40	2.56	2.19	2.35	2.48	2.18	2.31	2.42
13.0	2.23	2.61	2.84	2.20	2.50	2.72	2.18	2.41	2.60	2.16	2.36	2.53	2.14	2.30	2.44	2.13	2.27	2.39
13.5	2.18	2.57	2.81	2.15	2.47	2.68	2.13	2.37	2.56	2.11	2.32	2.49	2.09	2.26	2.41	2.08	2.23	2.35
14.0	2.13	2.54	2.78	2.11	2.43	2.65	2.08	2.34	2.53	2.07	2.29	2.46	2.05	2.23	2.38	2.03	2.19	2.32

Fuente: Manual de Diseño de Pavimento, Cemex.

Proceso iterativo para losa con espesores de 6.5 y 7.5 pulgadas

Cálculo para espesor propuesto de losa de concreto de 6.5 pulgadas

1. Esfuerzo Equivalente

Tabla 68: Cálculo de esfuerzo equivalente para ejes sencillo y tandem para losa de 6.5 pulgadas. (Ver Anexo, tabla 66, página XIII)

Tipo de eje	k de subrasante (pci)		
	200	246	300
Sencillo	314	308	300
Tándem	267	256	224

Fuente: Elaboración Propia

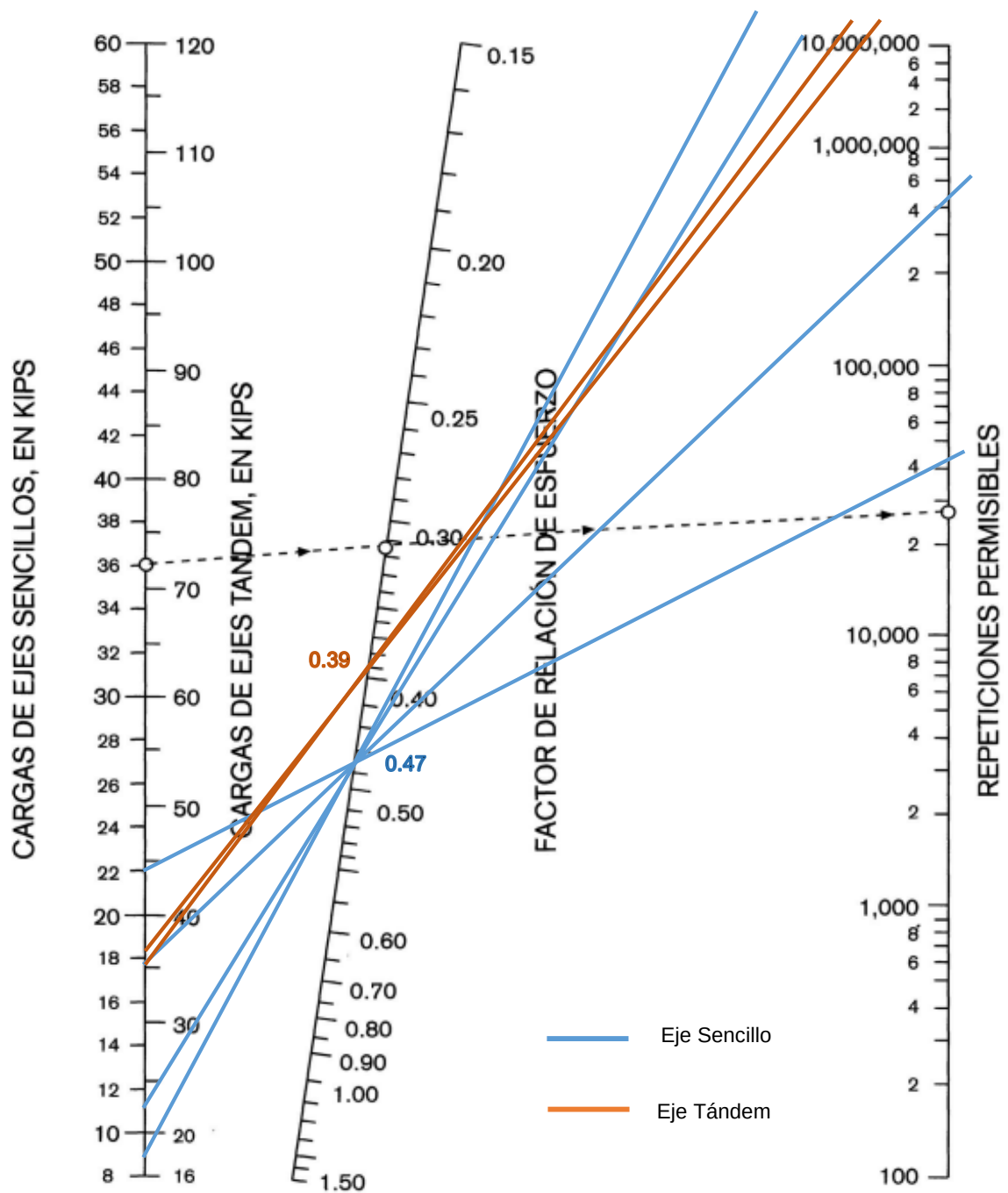
2. Relación de Esfuerzos

$$R.esf (eje sencillo) = \frac{308}{652.5} = 0.47$$

$$R.esf (eje tandem) = \frac{256}{652.5} = 0.39$$

3. Análisis por Fatiga

Imagen 12: Nomograma para análisis de Fatiga (repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con o sin apoyo lateral)



Fuente: Nomograma proporcionado por Manual de Diseño y Construcción de Pavimento CEMEX, página 58. Trazado, Elaboración Propia.

4. Factor de Erosión

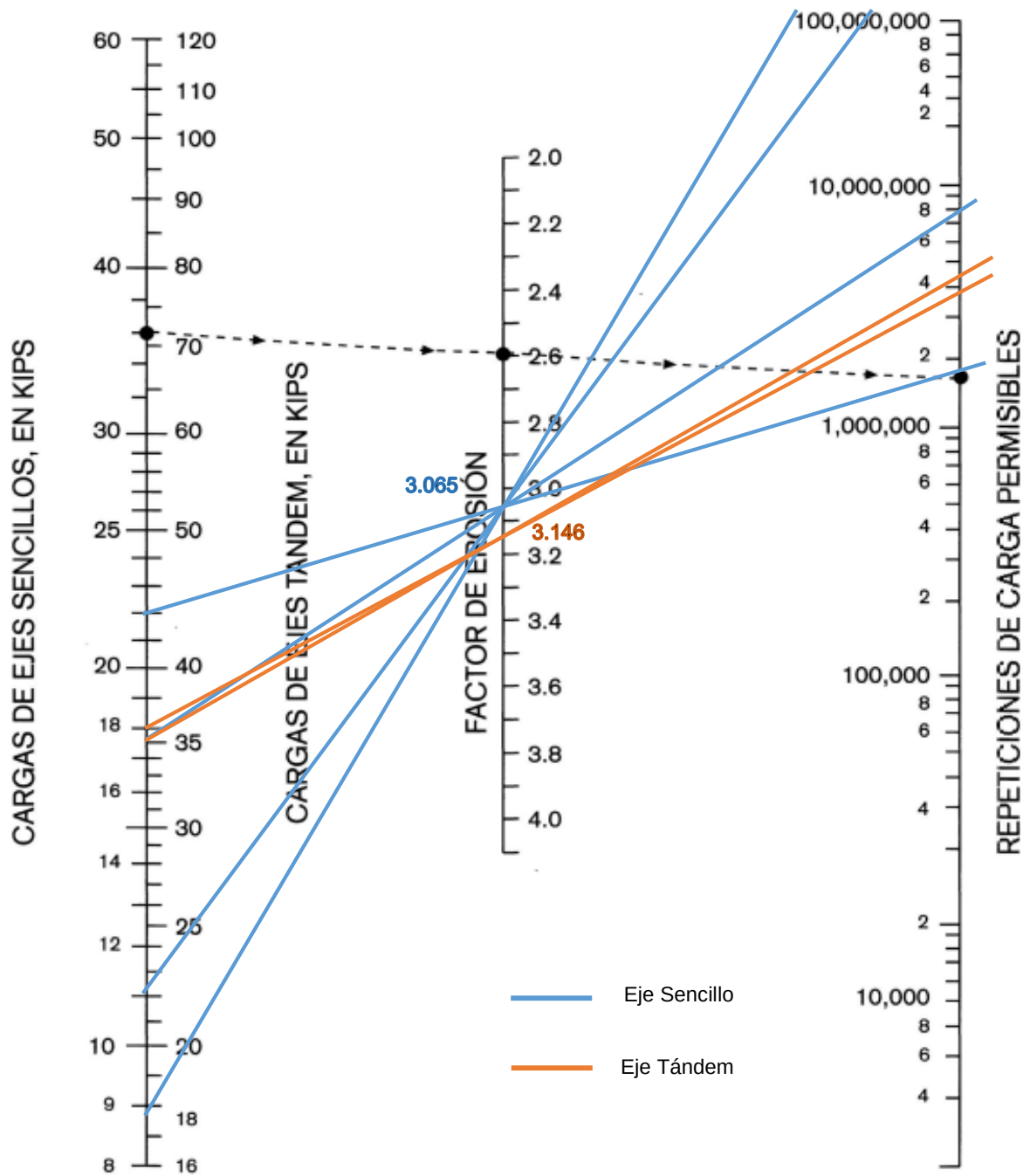
Tabla 69: Cálculo de factor de erosión para ejes sencillo y tándem para losa de 6.5 pulgadas. (Ver Anexo, tabla 67, página XIV)

Tipo de eje	k de subrasante (pci)		
	200	264	300
Sencillo	3.07	3.065	3.06
Tándem	3.16	3.146	3.13

Fuente: Elaboración Propia

5. Análisis por Erosión

Imagen 13: Nomograma para análisis de Erosión. (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, sin apoyo lateral).



Fuente: Nomograma proporcionado por Manual de Diseño y Construcción de Pavimento CEMEX, página 60. Trazado, Elaboración Propia.

Tabla 70: Cálculo del espesor de losa de concreto de 6.5 pulgadas

Proyecto: Diseño de pavimento rígido Cuajachillo # 1 - Nejapa

Espesor Inicial:	<u>6.5</u>	Pasajuntas:	SI	<u>√</u>	NO	<u>√</u>
Modulo de Reaccion K de la Subrasante:	<u>246</u>	Apoyo Lateral:	SI	<u>√</u>	NO	<u>√</u>
Modulo de Ruptura, MR:	<u>652.5</u>	Periodo de Diseño (Años):		<u>20</u>		
Factor de Seguridad, LSF:	<u>1</u>	Base Granular:		<u>6"</u>		

Carga de eje en Kips	Multiplicada por LSF	Repeticiones Esperadas	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
			Repeticiones Permisibles	% de Fatiga	Repeticiones Permisibles	% de Daño
1	2	3	4	5	6	7

8. Esfuerzo Equivalente 308 10. Factor de Erosión 3.065
9. Factor de Relación de Esfuerzo 0.47

Eje Sencillos

8.8	8.8	251,643	Ilimitado	0	Ilimitado	0
11	11	154,069	Ilimitado	0	Ilimitado	0
17.6	17.6	169,474	480,000	35.31	7,900,000	2.15
22	22	128,390	46,000	279.11	1,800,000	7.13
Sub Total de Ejes Sencillos				314.42		9.28

10. Esfuerzo Equivalente 256 13. Factor de Erosión 3.146
11. Factor de Relación de Esfuerzo 0.39

Eje Tandem

35.2	35.2	20,544	Ilimitado	0	4,300,000	0.48
36.3	36.3	15,407	Ilimitado	0	3,600,000	0.43
Sub Total de Ejes Tandem				0		0.91

% Total Fatiga: **314.42** % Total Erosión: **10.18**

Fuente: Cálculos, elaboración propia.

Formato: Manual de Diseño de Pavimento, Cemex.

Cálculo para espesor propuesto de losa de concreto de 7.5 pulgadas

1. Esfuerzo Equivalente

Tabla 71: Cálculo de esfuerzo equivalente para ejes sencillo y tandem para losa de 7.5 pulgadas. (Ver Anexo, tabla 66, página XIII)

Tipo de eje	k de subrasante (pci)		
	200	246	300
Sencillo	265	256	246
Tándem	224	214	203

Fuente: Elaboración Propia

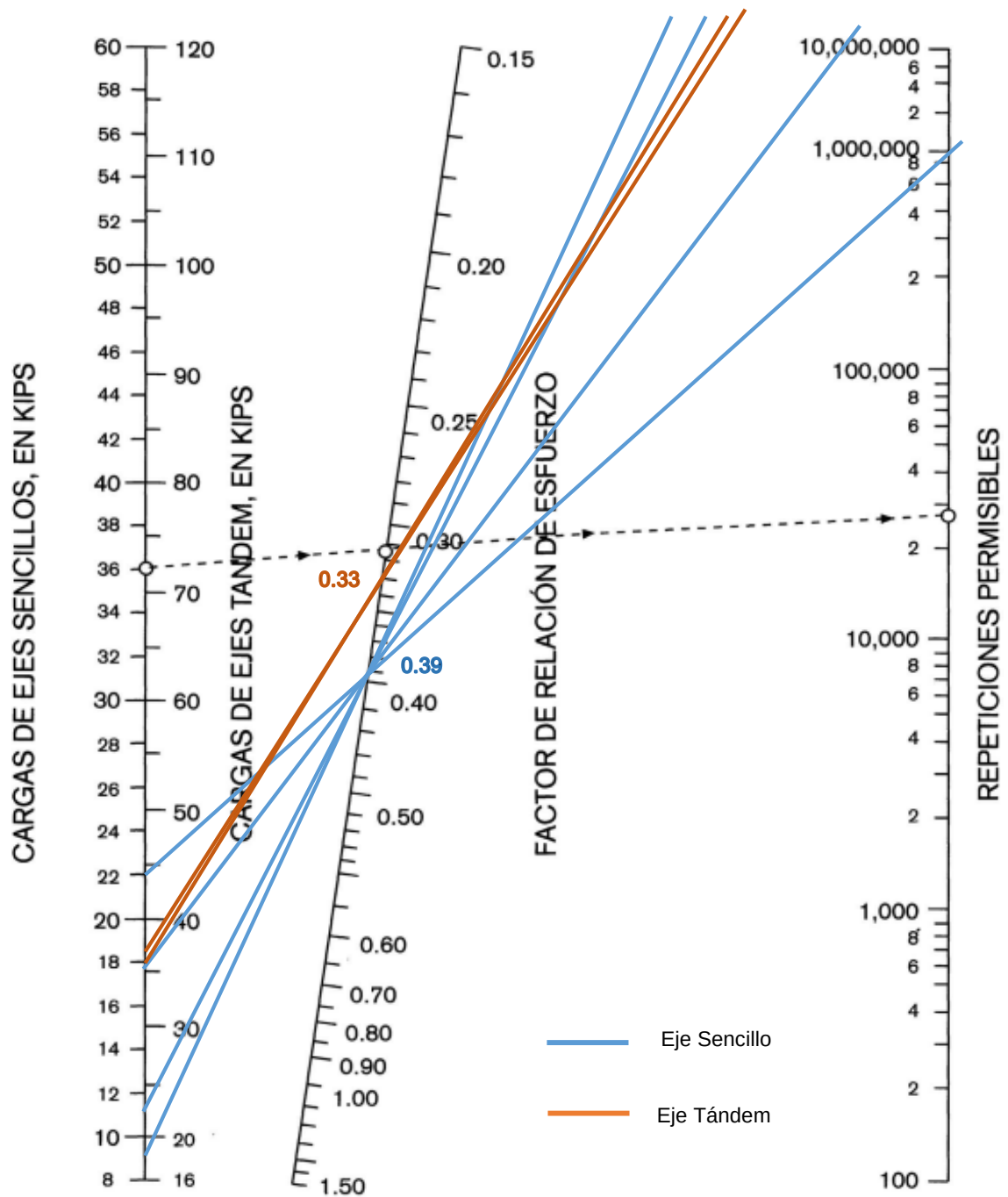
2. Relación de Esfuerzo

$$R.esf (eje sencillo) = \frac{256}{652.5} = 0.39$$

$$R.esf (eje tándem) = \frac{214}{652.5} = 0.33$$

3. Análisis por Fatiga

Imagen 14: Nomograma para análisis de Fatiga (repeticiones permisibles basadas en el factor de relación de esfuerzo, con o sin apoyo lateral)



Fuente: Nomograma proporcionado por Manual de Diseño y Construcción de Pavimento CEMEX, página 58. Trazado, Elaboración Propia.

4. Factor de Erosión

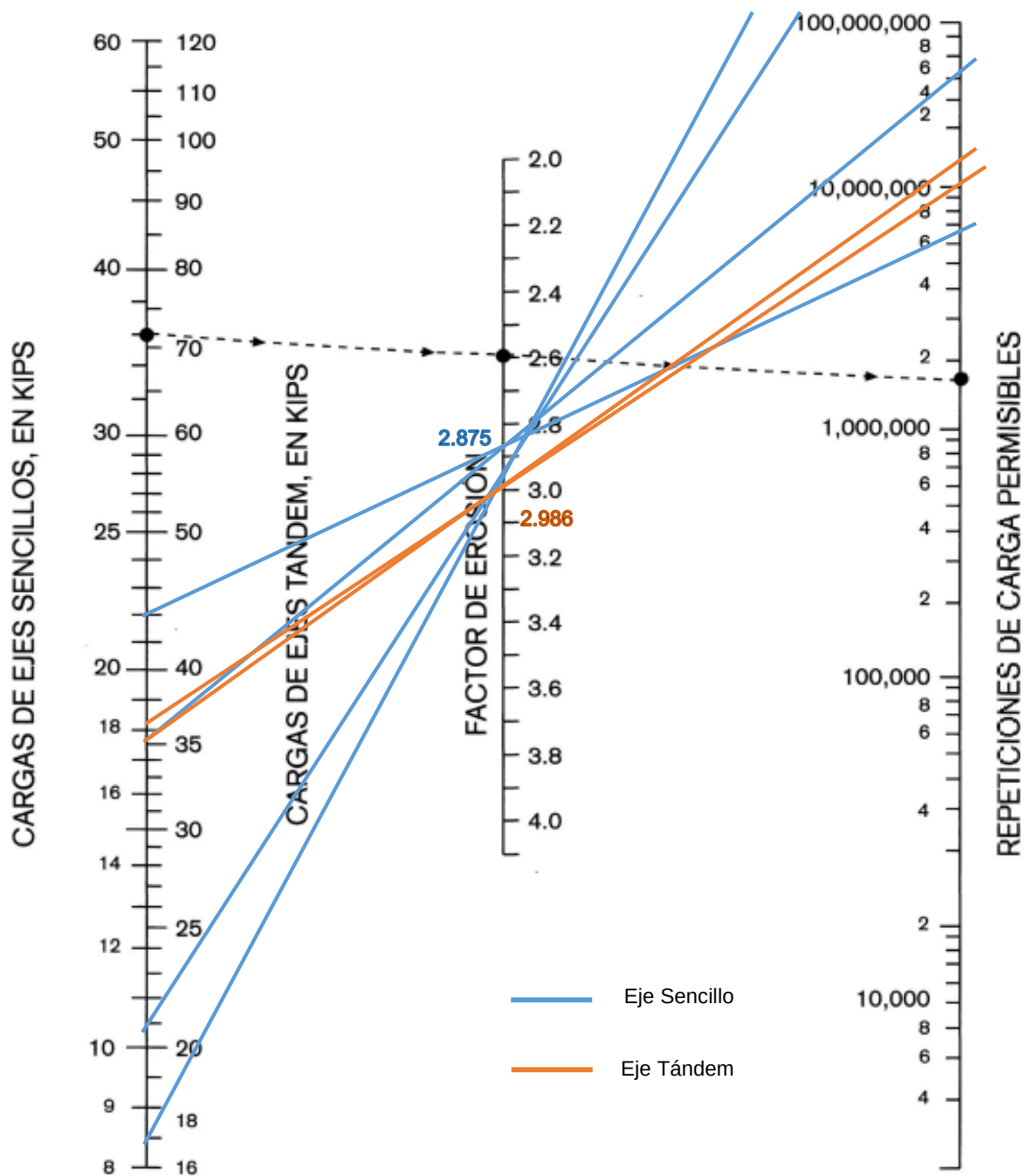
Tabla 72: Cálculo de factor de erosión para ejes sencillo y tándem para losa de 7.5 pulgadas. (Ver Anexo, tabla 67, página XIV)

Tipo de eje	k de subrasante (pci)		
	200	253	300
Sencillo	2.88	2.875	2.87
Tándem	3.00	2.986	2.97

Fuente: Elaboración Propia

5. Análisis por Erosión

Imagen 15: Nomograma para análisis de Erosión. (Repeticiones permisibles basadas en el factor de erosión, sin apoyo lateral).



Fuente: Nomograma proporcionado por Manual de Diseño y Construcción de Pavimento CEMEX, página 60. Trazado, Elaboración Propia.

Tabla 73: Cálculo del espesor de losa de concreto de 7.5 pulgadas

Proyecto: Diseño de pavimento rígido Cuajachillo # 1 - Nejapa

Espesor Inicial:	<u>7.5</u>	Pasajuntas:	SI	<u>✓</u>	NO	<u> </u>
Módulo de Reacción K de la Subrasante:	<u>246</u>	Apoyo Lateral:	SI	<u> </u>	NO	<u>✓</u>
Módulo de Ruptura, MR:	<u>652.5</u>	Periodo de Diseño (Años):		<u>20</u>		
Factor de Seguridad, LSF:	<u>1</u>	Base Granular:		<u>6"</u>		

Carga de eje en Kips	Multiplicada por LSF	Repeticiones Esperadas	Análisis por fatiga		Análisis por erosión	
			Repeticiones Permisibles	% de Fatiga	Repeticiones Permisibles	% de Daño
1	2	3	4	5	6	7

8. Esfuerzo Equivalente	<u>256</u>	10. Factor de Erosión	<u>2.875</u>
9. Factor de Relación de Esfuerzo	<u>0.39</u>		

Eje Sencillos

8.8	8.8	251,643	Ilimitado	0	Ilimitado	0
11	11	154,069	Ilimitado	0	Ilimitado	0
17.6	17.6	169,474	Ilimitado	0	65,000,000	0.26
22	22	128,390	1,000,000	12.84	6,500,000	1.98
Sub Total de Ejes Sencillos				12.84		2.24

11. Esfuerzo Equivalente	<u>214</u>	13. Factor de Erosión	<u>2.986</u>
12. Factor de Relación de Esfuerzo	<u>0.33</u>		

Eje Tandem

35.2	35.2	20,544	Ilimitado	0	14,000,000	0.15
36.3	36.3	15,407	Ilimitado	0	10,000,000	0.15
Sub Total de Ejes Tandem				0		0.30

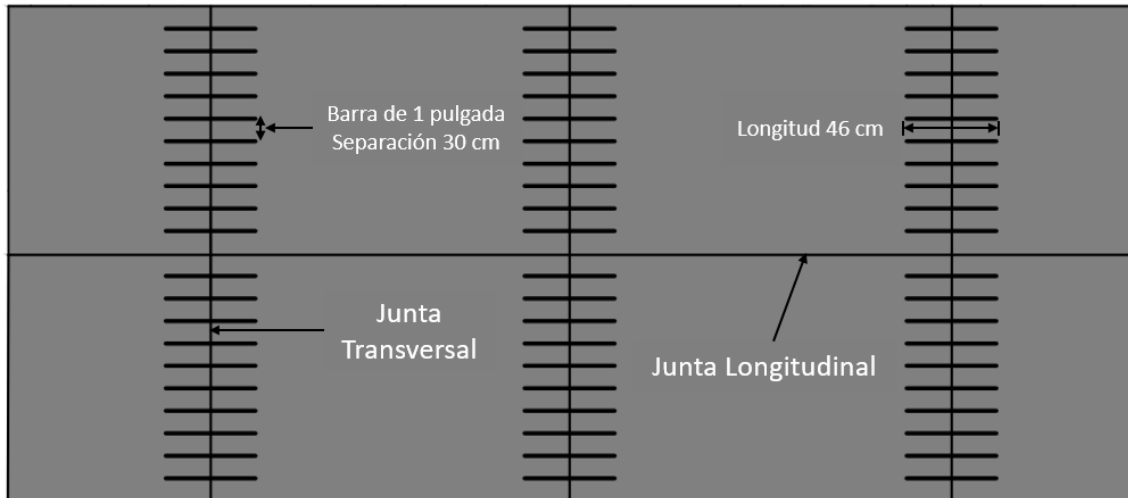
% Total Fatiga:	12.84	% Total Erosión:	2.54
-----------------	--------------	------------------	-------------

Fuente: Cálculos, elaboración propia.

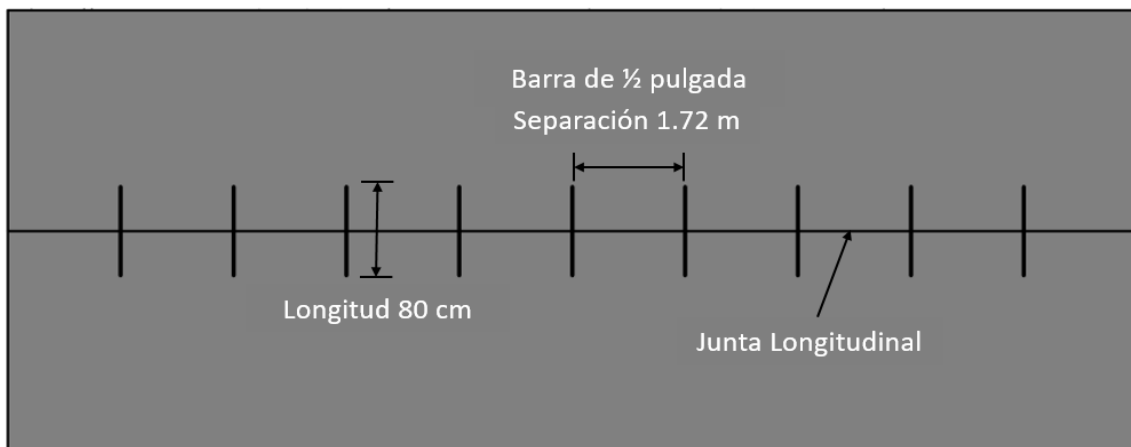
Formato: Manual de Diseño de Pavimento, Cemex.

Imagen 16: Detalles de barras pasajuntas y de amarre

Barra pasajuntas

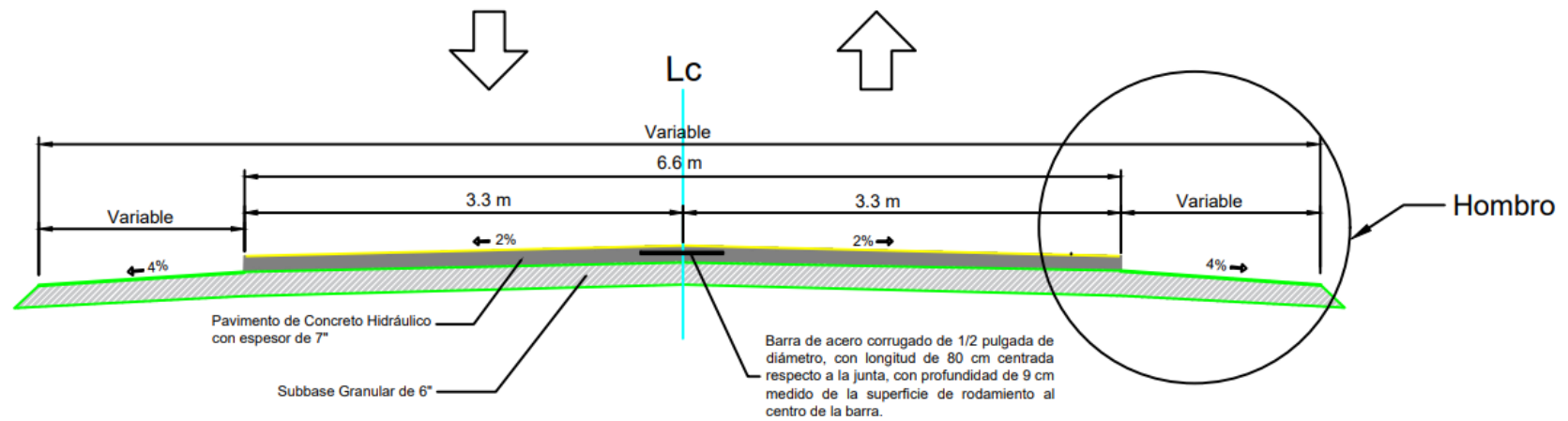


Barra de amarre



Fuente: Elaboración Propia

Imagen 17: Sección transversal típica de la vía



Fuente: Elaboración Propia