

GERENCIA DE ESTUDIOS Y FISCALIZACIÓN

Informe de Diseño de Pavimentos de la Dirección de Estudios

EVALUACIÓN FUNCIONAL Y ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO Y DISEÑO DE OBRAS DE REHABILITACIÓN: VÍA INTEROCEÁNICA (TRAMO PLAZA ARGENTINA – PIFO, DE 21 km DE LONGITUD).

FECHA: 22/02/2024

1. ANTECEDENTES.

El presente estudio se realizó, de conformidad al Memorando Nro. EPMMOP-GP-2024-0376-M de fecha 31 de enero 2024, en el que se solicita remitir a la Gerencia de Planificación, los estudios de evaluación estructural y funcional del pavimento de la Av. Oswaldo Guayasamín (Interoceánica).

2. INTRODUCCIÓN

2.1 UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

La vía interoceánica (Av. Oswaldo Guayasamín), ubicada en la zona oriental del DMQ, une las poblaciones del Cantón Quito con las poblaciones de Cumbayá, Puembo, Tumbaco y Pifo, en un tramo de 22,30 km de longitud, en cuyo desarrollo se intercepta con la Av. Simón Bolívar, Cumbayá y Av. Intervalles (Tumbaco), siendo estos puntos considerados como los más importantes, por aportar un volumen de tráfico representativo.

La Av. Oswaldo Guayasamín inicia en el intercambiador Plaza Argentina (km 0+000), atraviesa el Túnel Oswaldo Guayasamín de 1,31 km de longitud, que inicia en el km 0+430 y culmina en el km 1+740, por el que transitan vehículos livianos.

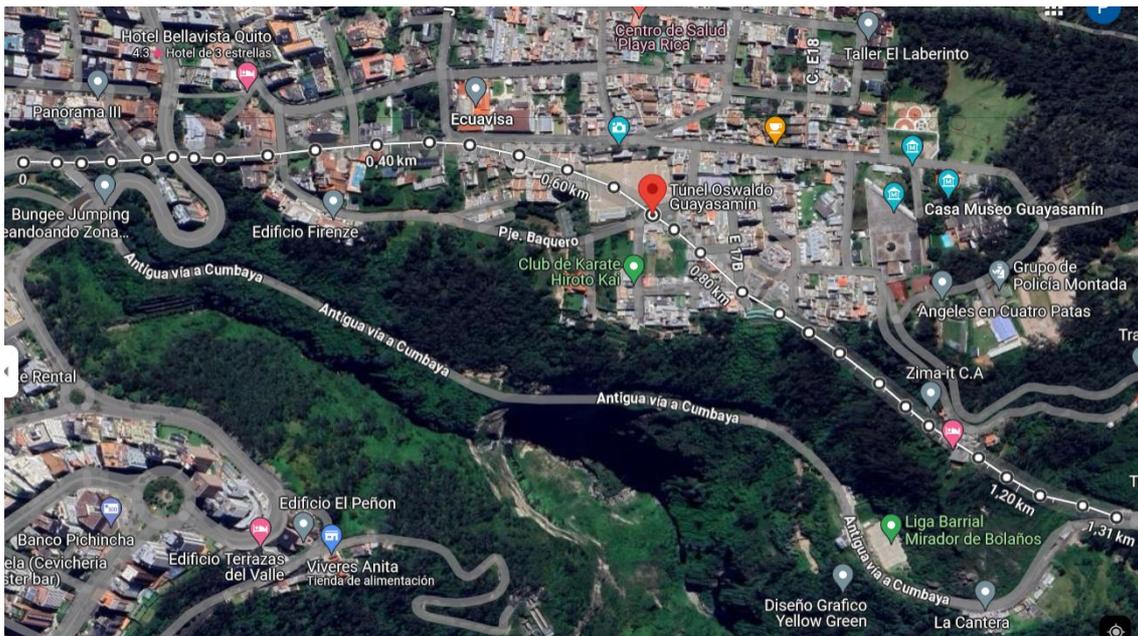


Figura 1. Trazado del Túnel Oswaldo Guayasamín.

El estudio se realizó desde el km 2+700 (a 10m del peaje Guayasamín), hasta el km 22+297,47 (Pifo). Dado el elevado volumen de tráfico y congestión existentes entre el intercambiador Plaza

Argentina (km 0+000) y el peaje Guayasamín (km 2+690), no fue posible realizar las mediciones requeridas para la evaluación del pavimento. La capa de rodadura en el tramo comprendido Plaza Argentina - salida Túnel Oswaldo Guayasamín se conforma por pavimento rígido, y el tránsito se compone por vehículos livianos.



Figura 2. Inicio del estudio: km 2+600 (pasando el Peaje Guayasamín).

El tramo de estudio (2+700 – 22+297,47), se ubica entre las siguientes coordenadas (UTM Quito):

ABSCISA	NORTE (m)	ESTE (m)	Z (m)	Descripción
2+700	9'978.781,240	504.476,206	2.641,592	A 10m del Peaje Guayasamín
22+297,47	9'975.260,887	516.755,737	2.572,590	Piño

2.2 ESTADO ACTUAL DE LA CAPA DE RODADURA.

La capa de rodadura presenta diversas tipologías de fallas, debidas a la fatiga por la acción de las cargas del tránsito.

No obstante, las fallas pueden estar asociadas a factores ajenos al tránsito (AASHTO, 1993). Módulos elásticos excesivamente altos, debidos a la edad de la carpeta asfáltica, pueden ser también, la causa de grietas y otros tipos de fallas.

Las fotografías siguientes muestran secciones de la vía con varios deterioros observados en las inspecciones realizadas:



Foto 1. Falla tipo "Piel de cocodrilo" km 7 Bache. Km 21+500. Calzada derecha



Foto 2. Grieta longitudinal y Calzada derecha



Foto 3. Desgastes. Km 20. 7+500. Calzada derecha.



Foto 4. Falla "Piel de cocodrilo" y desgaste. Km Calzada izq.



Foto 5. Piel de cocodrilo. Km 12+100 Calzada izquierda



Foto 6. Grieta transversal, km 14+600. Calzada derecha.

2.3 INSUMOS RECIBIDOS.

Se detallan las comunicaciones recibidas con la información necesaria para elaborar el análisis funcional, estructural y diseño las obras de rehabilitación:

- Topografía de la vía Interoceánica. (Anexo 1).
- Aforos manuales de tráfico: documentos en físico y en archivo digital formato Excel: hojas de campo entregadas por personal de la EPMMOP. (Anexo 2).
- Aforo automático semanal de 24 horas. Intercambiador El Tanda. Estudio realizado por la empresa Consultora IDROBO Y ASOCIADOS. (Anexo 3)
- Levantamiento de fallas y niveles de severidad para cálculo del PCI. (Anexo 4).
- Reporte de espesores de capas existentes de pavimento (calicatas). (Anexo 5).
- Ensayos de suelos (material de subrasante y granular existentes). Clasificación de suelos mediante el sistema AASHTO. Ensayos de CBR de la subrasante, espesores de núcleos de carpeta existente y profundidad de fisuras. Ensayos de extracción de asfalto. (Anexo 6).
- Ensayos de deflectometría con la Viga Bénkelman. (Anexo 7).
- Ensayo de compresión diametral en núcleos de asfalto, para determinar el módulo resiliente de la capa asfáltica existente (Anexo 8).

2.4 ANEXOS DE CÁLCULOS.

- Cálculo del Índice de Condición actual del pavimento PCI (Anexo 9).
- Cálculo de módulos de elasticidad de la subrasante y material granular existente. (Anexo 10).

3. OBJETIVOS y ALCANCE.

3.1 OBJETIVOS.

1. Estudiar el estado actual del pavimento, mediante el , evaluaciones funcional y estructural.
2. Realizar una breve introducción explicativa del modelo de Hogg par el cálculo de módulos elásticos.
3. Calcular los módulos de elasticidad de la subrasante, su valor de soporte CBR, y los módulos elásticos de las capas superiores del pavimento, mediante la aplicación del modelo de Hogg, tomando como datos de entrada, las deflexiones del pavimento obtenidas del ensayo con Viga Bénkelman.
4. Realizar la excavación de calicatas para verificar la calidad de los materiales de las capas del pavimento existente, medir espesores de capas y realizar los ensayos de laboratorio requeridos en las muestras de suelo y núcleos de asfalto obtenidos, cuyos resultados permitirán establecer las obras de rehabilitación que mejor se ajusten a los tipos de suelo existentes, y realizar el diseño de estas.
5. Diseñar las obras de rehabilitación del pavimento, que mejor se ajusten a las condiciones de los suelos existentes, y a la funcionalidad en los tramos de la vía consolidados por zonas pobladas.

3.2 ALCANCE

El presente estudio, emplea el modelo de Hogg para el cálculo de módulos de elasticidad de la subrasante y de las capas superiores, para con los mismos, diseñar los espesores requeridos de las capas del pavimento. El modelo es aplicable al diseño de pavimentos flexibles en los cuales se hayan realizado ensayos de deflectometría con Viga Bénkelman.

4. METODOLOGÍA GENERAL.

La metodología empleada se ajusta a los objetivos planteados. El diseño de las obras de rehabilitación se realizó empleando el modelo de Hogg para el cálculo de los módulos de elasticidad de la subrasante y capas superiores, a partir de las deflexiones obtenidas mediante la técnica de ensayo no destructivo con Viga Bénkelman.

Se realizaron ensayos de CBR de campo, información que es de carácter comprobatorio de los valores de CBR obtenidos con el Modelo de Hogg. A continuación, se describe la metodología empleada por etapas:

1. Estudio de tráfico y cálculo del número de ejes simples equivalentes a 8,2 toneladas (18000 lb).
2. Evaluación funcional del pavimento, mediante el cálculo del Índice de Condición actual del pavimento o PCI. Aplicación de la norma ASTM D 6433-18.
3. Estudio de deflexiones. Elaboración del deflectograma. Identificación de zonas homogéneas y puntos singulares por tramificación y cálculo de parámetros estadísticos para cada subtramo: deflexión media y deflexión característica.
4. Obtención de muestras del material granular existente y subrasante, mediante la excavación de calicatas en los sitios identificados como singulares a partir del deflectograma.
5. Cálculo de los módulos de elasticidad por capas.
6. Diseño de espesores de carpeta asfáltica y capas de soporte, con empleo de los módulos de elasticidad calculados mediante el modelo de Hogg, a partir de las deflexiones obtenidas del ensayo con Viga Bénkelman.

5. ESTUDIO DE TRÁFICO.

5.1 INTRODUCCIÓN.

Se efectuaron aforos manuales en tres estaciones de la Av. Oswaldo Guayasamín, en el lapso de nueve días, del 8 al 9 de enero 2024, y del 15 al 21 de enero 2024. Debido a la situación de inseguridad a nivel Nacional en el período señalado, por el súbito aumento de actos delincuenciales, se dispuso que los aforos manuales se realicen en el horario 08:00 – 16:30, para precautelar la seguridad del personal.

5.2 IDENTIFICACIÓN DE LAS ESTACIONES DE AFORO.

Se identificaron las siguientes estaciones, consideradas las más importantes en cuanto que aportan un mayor flujo vehicular hacia la Av. Oswaldo Guayasamín:

Estación E1: Intersección Av. Oswaldo Guayasamín con Av. Simón Bolívar (km 3+370). Se dispuso de un aforador por sentido:

Calzada izquierda (sentido Pifo – Quito): se registró el flujo vehicular proveniente desde Pifo, y el que aporta la rampa derecha de acceso desde la Av. Simón Bolívar (flujo proveniente del sector Sur).

Calzada derecha (sentido Quito – Pifo): se registró el flujo vehicular proveniente desde Quito, y el que aporta la rampa izquierda de acceso desde la Av. Simón Bolívar (flujo proveniente del sector Norte).



Figura 3. Estación de aforo vehicular E1: Intersección con Av. Simón Bolívar.

Estación E2: Intersección Av. Oswaldo Guayasamín con Intercambiador Paseo San Francisco (km 8+300). Se dispuso de un aforador por sentido:

Calzada izquierda (sentido Pifo – Quito): se registró el flujo vehicular proveniente desde Pifo, el proveniente desde la calle aledaña al Centro Comercial Paseo San Francisco, y el que aporta la calle aledaña a la Universidad San Francisco de Quito. Para este fin, el aforador se ubicó

Calzada derecha (sentido Quito – Pifo): se registró el flujo vehicular proveniente desde Quito, y los aportantes desde la calle aledaña a la Universidad San Francisco de Quito, y el giro desde la calle del Centro Comercial Paseo San Francisco.

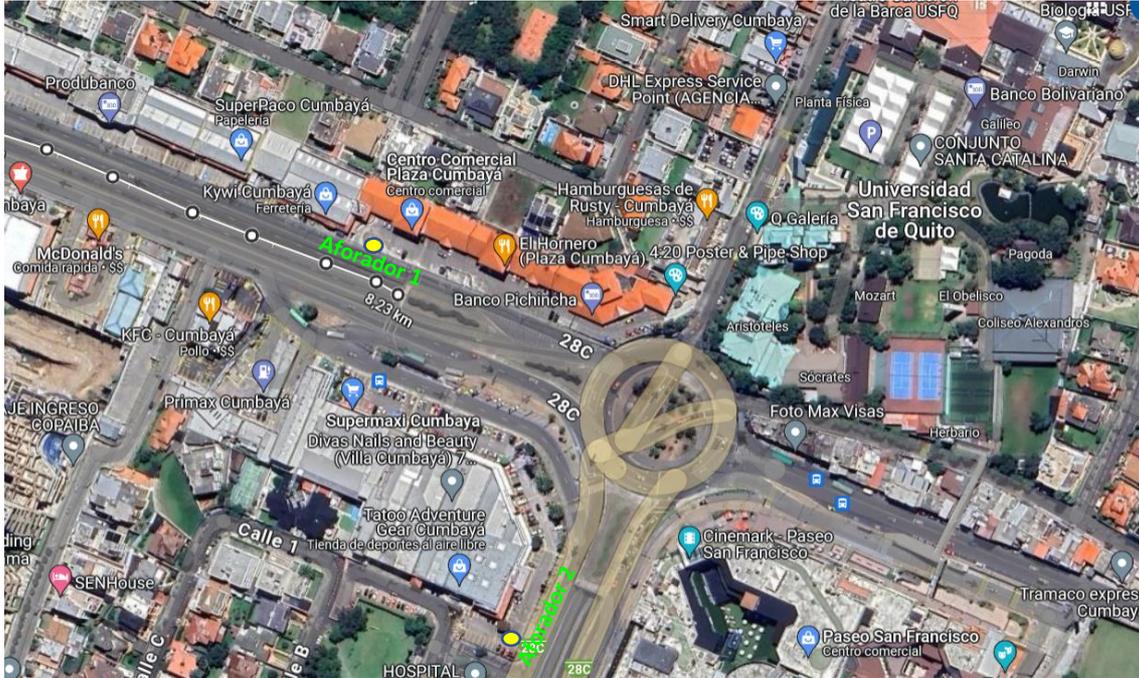


Figura 4. Estación de aforo vehicular E2: intercambiador Paseo San Francisco.

Estación E3: Intersección Av. Oswaldo Guayasamín con la Av. Intervalles (km 11+400). Se dispuso de dos aforadores por sentido, ya que el volumen de tráfico es muy elevado en esta intersección:

Calzada izquierda (sentido Pifo – Quito): se registró el flujo vehicular proveniente desde Pifo, Tumbaco, y los giros provenientes de la Av. Intervalles, que corresponde al flujo de vehículos proveniente de Sangolquí y san Rafael, que optan por dirigirse hacia Quito.

Calzada derecha (sentido Quito – Pifo): se registró el flujo vehicular proveniente desde Quito, y el aportante desde la Av. Intervalles, que corresponde al flujo vehicular proveniente de Sangolquí y san Rafael, que optan por dirigirse hacia Tumbaco y hacia Pifo.



Figura 5. Estación de aforo vehicular E3: Intersección Av. Intervalles.

5.3 TIPOLOGÍA DE VEHÍCULOS.

Para los aforos manuales, se clasificaron los vehículos de acuerdo a la tipología que consta en la Norma Ecuatoriana Vial NEVI-12 (MTO, 2013), de acuerdo al detalle siguiente:

TIPO DE VEHÍCULO	DESIGNACIÓN MTO (NEVI-12)	Tipo de eje propulsor	CONFIGURACIÓN Y CARGAS MÁXIMAS POR EJE (ton) (NEVI-12)
Livianos "A1 y A2": automóviles, camionetas	—	Simple	Carga máxima = 1,75 toneladas
Buses: Bus colectivo Busetas o microbús	2 DA 2 D	Delantero Simple rueda simple, posterior simple dual	
C1 (2 ejes simples): Camión Volquete	2 DB V 2DB	Simple, dual	
C2 (3 ejes) Camión Volqueta	3A V 3A	Delantero simple rueda simple. Posterior Tandem, dual	
C3 (4 ejes) Camiones	4C	Delantero: simple. Posterior: Tridem, dual	
C4 :Plataformas y remolques: 4 ejes o más	2S2 y 2S3	Tandem direccional ,tandem posterior, o remolque con tridem	
Otros (Motos)	—	—	

Figura 6. Tipología de vehículos.

5.4 RESULTADOS DE LOS AFOROS MANUALES.

Los aforos iniciaron el lunes 8 de enero 2024. El martes 9 de enero se vieron interrumpidos en la tarde debido a la situación de inseguridad por los eventos violentos que se produjeron a nivel Nacional. Se retomaron los conteos el lunes 15 de enero 2024 hasta el domingo 21 de enero 2024. En Anexo 2 se adjuntan las hojas de campo, con el registro del aforo clasificado y el procesamiento por tipología de vehículos.

Estación E1: Intersección Av. Oswaldo Guayasamín con Av. Simón Bolívar (km 3+370)

Tabla 1. Aforo vehicular Estación E1

CALZADA: IZQUIERDA. SENTIDO PIFO - QUITO

FECHA	Livianos	Buseta	Bus colectivo	Camiones C-1	Camiones C-2	Camiones C-3:	Plataformas C-4	Otros (motos)	TOTAL POR DÍA
8/1/2024	6.596	154	4	114	0	1	0	454	7.323
9/1/2024	8.416	186	0	128	0	0	0	494	9.224
15/1/2024	8.772	179	1	141	1	0	0	614	9.708
16/1/2024	9.068	169	0	138	0	0	0	628	10.003
17/1/2024	9.240	166	1	138	1	0	0	628	10.174
18/1/2024	9.197	166	0	144	1	0	0	630	10.138
19/1/2024	9.233	165	2	133	3	0	0	609	10.145
20/1/2024	4.776	110	0	82	0	0	0	271	5.239
21/1/2024	3.711	95	0	57	2	0	0	202	4.067
TOTAL=	69.009	1.390	8	1.075	8	1	0	4.530	76.021

CALZADA: DERECHA. SENTIDO QUITO - PIFO

FECHA	Livianos	Buseta	Bus colectivo	Camiones C-1	Camiones C-2	Camiones C-3:	Plataformas C-4	Otros (motos)	TOTAL POR DÍA
8/1/2024	6.851	356	296	161	33	0	0	502	8.199
9/1/2024	8.463	405	377	168	29	0	1	622	10.065
15/1/2024	9.412	508	422	211	35	0	1	730	11.319
16/1/2024	9.599	517	437	183	37	0	0	757	11.530
17/1/2024	9.395	536	438	189	40	0	1	713	11.312
18/1/2024	9.273	539	441	213	49	0	2	669	11.186
19/1/2024	9.892	597	450	180	32	0	0	729	11.880
20/1/2024	6.220	278	280	203	34	0	0	471	7.486
21/1/2024	4.031	290	210	168	10	0	0	376	5.085
TOTAL=	73.136	4.026	3.351	1.676	299	0	5	5.569	88.062

TRÁNSITO OBSERVADO "To" AMBOS SENTIDOS: ESTACIÓN E1

To = No. Total de veh. / período de conteo

FECHA	Livianos	Buseta	Bus colectivo	Camiones C-1	Camiones C-2	Camiones C-3:	Plataformas C-4	Otros (motos)	TOTAL POR DÍA
8/1/2024	13.447	510	300	275	33	1	0	956	15.522
9/1/2024	16.879	591	377	296	29	0	1	1.116	19.289
15/1/2024	18184	687	423	352	36	0	1	1344	21.027
16/1/2024	18667	686	437	321	37	0	0	1385	21.533
17/1/2024	18635	702	439	327	41	0	1	1341	21.486
18/1/2024	18470	705	441	357	50	0	2	1299	21.324
19/1/2024	19125	762	452	313	35	0	0	1338	22.025
20/1/2024	10996	388	280	285	34	0	0	742	12.725
21/1/2024	7.742	385	210	225	12	0	0	578	9.152
TOTAL=	142.145	5.416	3.359	2.751	307	1	5	10.099	164.083
To =	15.794	602	374	306	35	1	1	1.123	
COMPOSICIÓN (%)=	86.63	3.30	2.05	1.68	0.19	0.00	0.00	6.15	

Estación E2: Intersección Av. Oswaldo Guayasamín con Intercambiador Paseo San Francisco (km 8+300)

Tabla 2. Aforo vehicular estación E2

CALZADA: IZQUIERDA. SENTIDO PIFO - QUITO

FECHA	Livianos	Buseta	Bus colectivo	Camiones C-1	Camiones C-2	Camiones C-3:	Plataformas C-4	Otros (motos)	TOTAL POR DÍA
8/1/2024	4.900	168	259	126	2	0	0	427	5.882
9/1/2024	5.610	169	321	128	7	0	0	472	6.707
15/1/2024	7.980	242	389	155	4	0	1	587	9.358
16/1/2024	7.760	296	427	187	5	0	0	637	9.312
17/1/2024	7.179	205	451	198	13	0	2	532	8.580
18/1/2024	7.670	226	405	233	3	0	2	596	9.135
19/1/2024	7.920	229	391	214	5	0	0	605	9.364
20/1/2024	5.185	107	309	122	5	0	1	421	6.150
21/1/2024	3.650	65	244	49	0	0	0	287	4.295
TOTAL=	57.854	1.707	3.196	1.412	44	0	6	4.564	68.783

CALZADA: DERECHA. SENTIDO QUITO - PIFO

NÚMERO DE CARRILES POR CALZADA = 2

FECHA	Livianos	Buseta	Bus colectivo	Camiones C-1	Camiones C-2	Camiones C-3:	Plataformas C-4	Otros (motos)	TOTAL POR DÍA
8/1/2024	5.784	299	58	246	8	2	22	221	6.640
9/1/2024	8.492	340	71	255	4	1	32	303	9.498
15/1/2024	9.938	326	35	282	13	0	33	731	11.358
16/1/2024	10.103	433	22	309	11	0	34	646	11.558
17/1/2024	13.566	408	25	352	9	1	32	600	14.993
18/1/2024	9.707	458	29	352	8	3	30	626	11.213
19/1/2024	10.398	503	11	302	9	0	32	571	11.826
20/1/2024	6.817	96	17	55	9	0	7	378	7.379
21/1/2024	5.001	36	0	33	4	0	4	291	5.369
TOTAL=	79.806	2.899	268	2.186	75	7	226	4.367	89.834

TRÁNSITO OBSERVADO AMBOS SENTIDOS: ESTACIÓN E2

To = No. Total de veh. / período de conteo

FECHA	Livianos	Buseta	Bus grande	Camiones C-1	Camiones C-2	Camiones C-3:	Plataformas C-4	Otros (motos)	TOTAL POR DÍA
8/1/2024	10.684	467	317	372	10	2	22	648	12.522
9/1/2024	14.102	509	392	383	11	1	32	775	16.205
15/1/2024	17918	568	424	437	17	0	34	1318	20.716
16/1/2024	17863	729	449	496	16	0	34	1283	20.870
17/1/2024	20745	613	476	550	22	1	34	1.132	23.573
18/1/2024	17377	684	434	585	11	3	32	1222	20.348
19/1/2024	18318	732	402	516	14	0	32	1176	21.190
20/1/2024	12002	203	326	177	14	0	8	799	13.529
21/1/2024	8.651	101	244	82	4	0	4	578	9.664
TOTAL=	137.660	4.606	3.464	3.598	119	7	232	8.931	158.617
To =	15.296	512	385	400	14	1	26	993	
COMPOSICIÓN (%)=	86,79	2,90	2,18	2,27	0,08	0,00	0,15	5,63	

Estación E3: Intersección Av. Oswaldo Guayasamín con la Av. Intervalles (km 11+400).

Tabla 3. Aforo vehicular estación E3.

CALZADA: IZQUIERDA. SENTIDO PIFO - QUITO

NÚMERO DE CARRILES POR CALZADA = 2

FECHA	Livianos	Buseta	Bus colectivo	Camiones C-1	Camiones C-2	Camiones C-3:	Plataformas C-4	Otros (motos)	TOTAL POR DÍA
8/1/2024	5.956	190	240	179	4	0	3	488	7.060
9/1/2024	7.130	279	298	248	6	0	1	626	8.588
15/1/2024	8.811	207	298	238	2	0	0	808	10.364
16/1/2024	8.124	200	284	242	17	7	1	685	9.560
17/1/2024	8.577	204	295	268	7	0	3	730	10.084
18/1/2024	8.834	223	284	269	7	0	1	709	10.327
19/1/2024	9.280	220	288	246	7	0	3	757	10.801
20/1/2024	7.033	98	199	127	11	0	1	533	8.002
21/1/2024	5.610	66	191	41	0	0	0	458	6.366
TOTAL=	69.355	1.687	2.377	1.858	61	7	13	5.794	81.152

CALZADA: DERECHA. SENTIDO QUITO - PIFO

NÚMERO DE CARRILES POR CALZADA = 2

FECHA	Livianos	Buseta	Bus colectivo	Camiones C-1	Camiones C-2	Camiones C-3:	Plataformas C-4	Otros (motos)	TOTAL POR DÍA
8/1/2024	4.902	212	256	139	2	1	2	628	6.142
9/1/2024	6.060	264	336	213	14	0	3	861	7.751
15/1/2024	6.927	86	209	77	4	0	1	796	8.100
16/1/2024	7.762	255	319	274	11	0	5	833	9.459
17/1/2024	8.354	286	346	272	18	0	3	1.069	10.348
18/1/2024	8.006	278	314	298	8	0	2	1.216	10.122
19/1/2024	8.066	297	331	330	5	0	3	1.231	10.263
20/1/2024	6.420	144	241	147	7	0	2	832	7.793
21/1/2024	5.216	98	209	63	3	1	1	582	6.173
TOTAL=	61.713	1.920	2.561	1.813	72	2	22	8.048	76.151

TRÁNSITO OBSERVADO AMBOS SENTIDOS: ESTACIÓN E3

To = No. Total de veh. / período de conteo

FECHA	Livianos	Buseta	Bus colectivo	Camiones C-1	Camiones C-2	Camiones C-3	Plataformas C-4	Otros (motos)	TOTAL POR DÍA
8/1/2024	10.858	402	496	318	6	1	5	1.116	13.202
9/1/2024	13.190	543	634	461	20	0	4	1.487	16.339
15/1/2024	15738	293	507	315	6	0	1	1604	18.464
16/1/2024	15886	455	603	516	28	7	6	1518	19.019
17/1/2024	16931	490	641	540	25	0	6	1.799	20.432
18/1/2024	16840	501	598	567	15	0	3	1925	20.449
19/1/2024	17346	517	619	576	12	0	6	1988	21.064
20/1/2024	13453	242	440	274	18	0	3	1365	15.795
21/1/2024	10.826	164	400	104	3	1	1	1.040	12.539
TOTAL=	131.068	3.607	4.938	3.671	133	9	35	13.842	157.303
To =	14.564	401	549	408	15	1	4	1.538	
COMPOSICIÓN (%)=	83,32	2,29	3,14	2,33	0,08	0,01	0,02	8,80	

5.5 FACTORES ESTACIONALES.

El tráfico observado, debe afectarse por factores estacionales, debido a que el conteo se realizó por un período de tiempo de 9 días, que no es suficiente para evaluar las variaciones que experimenta el tráfico en períodos más largos (semanal, mensual), ya que, dependiendo de las épocas del año, los viajes experimentan cambios importantes. En otro aspecto, los aforos se realizaron en horario de 8:00 a 16:30, y deben calibrarse con aforos automáticos semanales de 24 horas que, considera el tráfico total por cada día.

5.5.1 Factor Horario FH.

Este factor se emplea, por el hecho de no disponer de aforos manuales de 24 horas. Se calcula en referencia a aforos automáticos semanales de 24 horas. En el Anexo3, se muestran los resultados de aforos automáticos realizados en febrero 2020, en el intercambiador El Tanda de la Av. Oswaldo Guayasamín, por la Empresa Consultora RDS-IDROBO Y ASOCIADOS (Anexo 3). El resumen del aforo automático es el siguiente:

Tabla 4. Resumen de aforo vehicular automático.

TIPO DE VEHÍCULO	MOTOS	LIVIANOS	2 EJES (NO LIV)	3 EJES	4 EJES	5EJES	6 EJES	OTROS	TOTAL
TOTAL VEH. SEMANA 9-15 feb2020=	6915	276675	17764	2524	6107	188	2132	5028	312.305
COMPOSICIÓN (%) =	2,18	87,19	5,60	0,80	1,92	0,06	0,67	1,58	

La fórmula general para el factor horario es:

$$FH = \frac{\text{No. total veh. en semana de conteo automático } 0:00 - 24:00}{\text{No. total veh. en semana de conteo manual } 07:00 - 19:00}$$

Los aforos manuales se realizaron en horario de 08:00 a 16:30 para preservar la seguridad del personal, debido a la situación de inseguridad a nivel Nacional que experimentó el País. El período de aforo fue de 9 días, en lugar de 7.

ESTACIÓN E1:

No. Total veh. Semana de conteo automático 0:00 - 24:00 = 312.305

No. Total veh. Semana de conteo manual 08:00 - 16:30 = 164.083

$$FH = \boxed{1,903}$$

ESTACIÓN E2:

No. Total veh. Semana de conteo automático 0:00 - 24:00 = 312.305

No. Total veh. Semana de conteo manual 08:00 - 16:30 = 158.617

FH =

ESTACIÓN E3:

No. Total veh. Semana de conteo automático 0:00 - 24:00 = 312.305

No. Total veh. Semana de conteo manual 08:00 - 16:30 = 157.303

FH =

5.5.2 Factor diario FD.

Permite transformar el volumen vehicular diario promedio, en volumen semanal promedio:

Para efectos de cálculo, el tráfico observado total T_o , es igual al número total de vehículos en el período de conteo, dividido para el período de conteo manual (9 días para este caso). La fórmula para calcular FD es:

$$FD = \frac{TPDS \text{ (aforo 08:00 a 16:30)}}{\text{Tráfico de un día específico en la semana}}$$

ESTACIÓN E1:

No. Total de veh. En periodo de conteo (horario 08:00 - 16:30) = 164.083

No. De días del aforo = 9

$T_o = TPDS = \text{No. Total veh. aforados (08:00 - 16:30)} / \text{No. Días de aforo} = 18.232$

Volumen vehicular del día _08-ene-2024 (mínimo registrado) = 15.522

$$FD = 18232 / 15522 = 1,175$$

ESTACIÓN E2:

No. Total de veh. En la semana (conteo 08:00 - 16:30) = 158.617

No. De días del aforo = 9

$TPDS = \text{No. Total veh. aforados (08:00 - 16:30)} / \text{No. Días de aforo} = 17.625$

Volumen vehicular del día _21-ene-2024 = 12.522 (menor número de vehículos)

$$FD = 17\ 625 / 12\ 522 = 1,408$$

ESTACIÓN E3:

No. Total de veh. En la semana (conteo 07:00 - 19:00) = 157.303

No. De días del aforo = 9

$TPDS = T_o = \text{No. Total veh. aforados (08:00 - 16:30)} / \text{No. Días de aforo} = 17.479$

Volumen vehicular del día _21-ene-2024 = 13.202 (menor número de vehículos)

$$FD = 17\ 479 / 13\ 202 = 1,324$$

5.5.3 Factor semanal FS.

Al no disponer de estadísticas semanales, se efectuó el cálculo con base en el número de semanas de cada mes del año. Para la semana base se adoptó febrero, con 4 semanas. De acuerdo con esto se elaboró el cuadro siguiente:

MES	No. SEMANAS	FS
ene-24	4,43	1,107
feb-24	4,00	1,000
mar-24	4,43	1,107
abr-24	4,29	1,071
may-24	4,43	1,107
jun-24	4,29	1,071
jul-24	4,43	1,107
ago-24	4,43	1,107
sep-24	4,29	1,071
oct-24	4,43	1,107
nov-24	4,29	1,071
dic-24	4,43	1,107

$$FS (\text{enero}_{2024}) = 4.43 / 4 = 1,107$$

(Estaciones de aforo E1, E2 y E3)

5.5.4 Factor mensual FM

Transforma el volumen promedio mensual, en volumen promedio anual. Su cálculo se realiza mediante la fórmula:

$$FM = \frac{\text{Consumo combustibles promedio mensual}}{\text{Consumo comb. correspondiente al mes de aforo}}$$

Para el consumo de combustibles, se consideró el consumo del año más próximo al año del aforo manual. Para este estudio, se utilizó el reporte de despacho de combustibles para la provincia de Pichincha, del año 2022 (FUENTE: Informe Estadístico enero – diciembre 2022 PETROECUADOR):

Tabla 5. Despacho de combustibles para Provincia de Pichincha (año 2022)

MES	PRODUCTO (GALONES)								TOTAL (GALONES)
	GASOLINA SÚPER	GASOLINA EXTRA	BASE	DIÉSEL 1	DIÉSEL 2	DIÉSEL PREMIUM	JET A-1	GLP	
Enero	18.596.382	3.588.564	6.206.592	10.920	4.586.274	16.615.746	4.019.988	1.827.420	55.451.886
Febrero	10.199.070	5.447.778	4.719.960	14.028	4.730.334	15.151.164	5.380.830	1.837.122	47.480.286
Marzo	15.519.042	8.770.566	5.407.248	14.070	4.819.080	17.242.050	4.663.974	2.051.700	58.487.730
Abril	15.334.284	7.063.014	5.226.018	13.272	4.966.374	15.466.080	4.009.782	2.043.678	54.122.502
Mayo	14.523.096	9.883.818	5.405.568	15.666	4.633.734	17.813.418	5.768.448	2.654.568	60.698.316
Junio	12.668.754	5.135.298	4.316.550	28.392	3.607.296	14.202.132	4.698.876	1.429.218	46.086.516
Julio	13.987.344	10.274.922	4.662.210	0	4.561.704	17.336.928	6.110.118	1.027.740	57.960.966
Agosto	15.284.724	5.161.086	5.020.974	14.952	4.646.124	17.982.426	5.698.140	1.630.482	55.438.908
Septiembre	14.391.804	12.780.726	5.083.974	12.894	5.256.174	15.392.454	4.245.360	1.824.564	58.987.950
Octubre	11.351.340	9.014.376	4.357.668	14.910	5.829.054	19.960.290	5.712.000	1.419.558	57.659.196
Noviembre	12.384.666	14.918.064	4.383.960	16.044	4.867.464	16.419.438	5.154.534	1.221.570	59.365.740
Diciembre	10.562.244	13.112.484	3.810.492	12.474	4.851.336	19.601.484	5.969.082	410.508	58.330.104
CONSUMO PROMEDIO MENSUAL (gal) =									55.839.175

$$FM = 55.839,175 / 55.451,886 = 1,007$$

(Estaciones de aforo E1, E2 y E3)

Tabla 6. Resumen de factores estacionales.

FACTOR	Estación E1	Estación E2	Estación E3
Horario FH	1,903	1,969	1,985
Diario FD	1,175	1,408	1,324
Semanal FS	1,107	1,107	1,107
Mensual FM	1,007	1,007	1,007

5.6 ROYECCIONES DEL TRÁNSITO.

Se adoptó un período de diseño de 10 años, considerando que se hará la rehabilitación de un pavimento existente.

$$n = 10 \text{ años.}$$

El crecimiento del parque automotor se da en relación directa con el crecimiento poblacional, por lo que se tomaron como datos de partida, las estadísticas de población publicadas por el (INEC, www.inec.gob.ec, 2024), desde el año 2010 hasta el año 2020.

Hasta el año 2007, el INEC reporta estadísticas de la población y matriculación de vehículos con agregación de Santo Domingo de los Tsáchilas, que pertenecía a la provincia de Pichincha, por lo que se emplearon las estadísticas del INEC de población y de matriculación de vehículos desde el año 2010, que contemplan únicamente la provincia de Pichincha.

5.6.1 Proyección de población para la provincia de Pichincha.

Tabla 7. Proyecciones de población. Provincia de Pichincha (INEC). Año base = 2010.

AÑO	t	POBLACIÓN (INEC)	POBLACIÓN CALCULADA	TASA DE CRECIMIENTO
2010	0	2.667.953,00	2.667.474	2,13
2011	1	2.723.509,00	2.723.546	2,11
2012	2	2.779.370,00	2.779.618	2,06
2013	3	2.835.373,00	2.835.690	2,02
2014	4	2.891.472,00	2.891.762	1,98
2015	5	2.947.627,00	2.947.833	1,94
2016	6	3.003.799,00	3.003.905	1,91
2017	7	3.059.971,00	3.059.977	1,87
2018	8	3.116.111,00	3.116.049	1,84
2019	9	3.172.200,00	3.172.121	1,8
2020	10	3.228.233,00	3.228.193	1,77

Por regresión lineal, se determinó la tasa de crecimiento anual para cada año, a partir de la ecuación de proyección

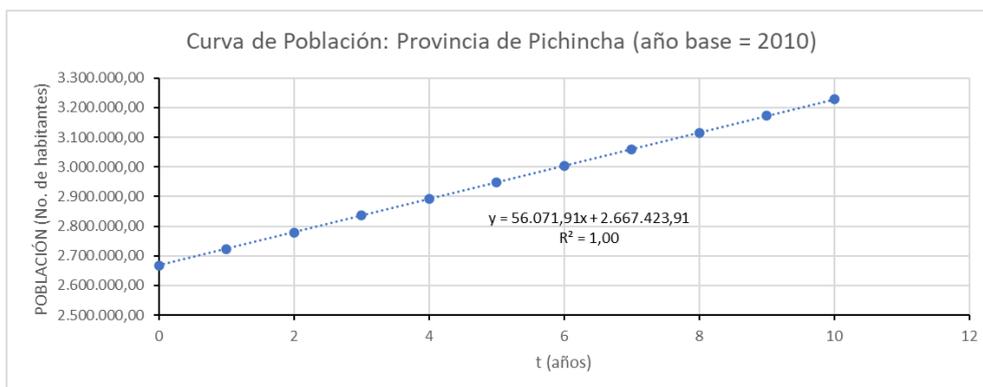


Gráfico 1. Población provincia de Pichincha.

Con la ecuación de ajuste del crecimiento poblacional, $y = 56071,91t + 2'667.423,91$, se calcularon las tasas de proyección para cada año, desde el 2010 hasta el 2020, mediante:

$$r = \left(\frac{P_f}{P_p}\right)^{1/t} - 1, \quad (1)$$

, siendo P_f = población futura; P_p = población presente; t = número de años. Los valores se muestran en la tabla 7.

Es de interés conocer la tasa de crecimiento en el año base 2010, para lo cual, mediante regresión lineal se determinó el valor $r = 2,13\%$, haciendo $t = 0$ en la ecuación de regresión (gráfico 2).

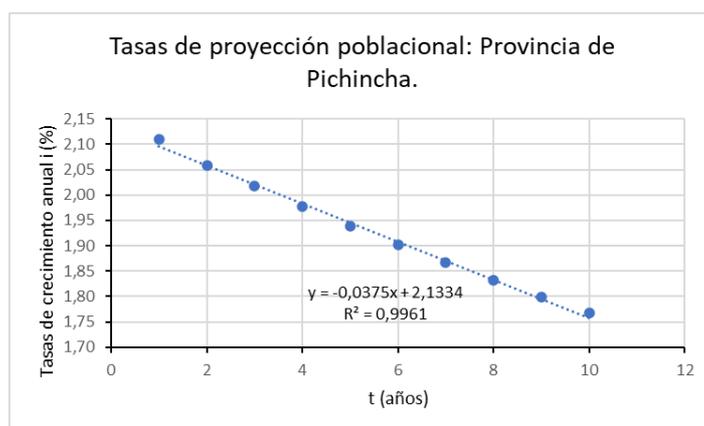


Gráfico 2. Tasas de crecimiento anual de población. Pichincha.

Las poblaciones no crecen de manera indefinida, viéndose frenado su crecimiento debido a falta de recursos naturales, situación social de la región, entre otros factores, llegando hasta una población de saturación P_s . En ese sentido, se empleó el modelo Logístico para predecir la población con base en las estadísticas 2010 a 2020. La tasa de crecimiento y la población del año base ($r = 2,13\%$; $P_i = 2'667.953$), son los datos de entrada para calcular la población futura de cada año. La ecuación del modelo logístico se expresa mediante:

$$P_{ajuste} = \frac{P_s \cdot P_i}{(P_s - P_i)e^{-rt} + P_i}; \quad (2)$$

; siendo e = base de los logaritmos naturales.

P_s = Población de saturación

P_i = Población del año base, para este caso, corresponde al año 2010

P_{ajuste} = Población proyectada al año t .

El proceso de cálculo supone asumir una población de saturación P_s , hasta obtener una curva que se ajuste a los datos estadísticos de población, disponibles de los años 2010 a 2020.

Tabla 8. Proyección de la población con el Modelo Logístico.

AÑO	t (años)	POBLACIÓN (DATOS INEC)	Pi	Ps	r (%)	P (ajuste)
2010	0	2.667.953	2.667.953	30.000.000	2,13	2.667.953
2011	1	2.723.509				2.720.182
2012	2	2.779.370				2.773.330
2013	3	2.835.373				2.827.409
2014	4	2.891.472				2.882.430
2015	5	2.947.627				2.938.406
2016	6	3.003.799				2.995.349
2017	7	3.059.971				3.053.272
2018	8	3.116.111				3.112.185
2019	9	3.172.200				3.172.101
2020	10	3.228.233				3.233.032
2021	11					3.294.990
2022	12					3.357.986
2023	13					3.422.032
2024	14					3.487.139
2025	15					3.553.320
2026	16					3.620.585
2027	17					3.688.946
2028	18					3.758.414
2029	19					3.829.000
2030	20					3.900.714
2031	21					3.973.568
2032	22					4.047.571
2033	23					4.122.734
2034	24					4.199.067
2035	25					4.276.580
2036	26					4.355.282
2037	27					4.435.183
2038	28					4.516.291
2039	29					4.598.616
2040	30					4.682.166
2041	31					4.766.949
2042	32					4.852.973
2043	33					4.940.245
2044	34					5.028.773
2045	35					5.118.563
2046	36					5.209.622
2047	37					5.301.956
2048	38					5.395.570
2049	39					5.490.469
2050	40					5.586.659
2051	41					5.684.143
2052	42					5.782.925
2053	43					5.883.009
2054	44					5.984.396

La población de saturación para la provincia de Pichincha resultó de 30'000.000 de habitantes.

La curva logística de población se muestra en la gráfica:

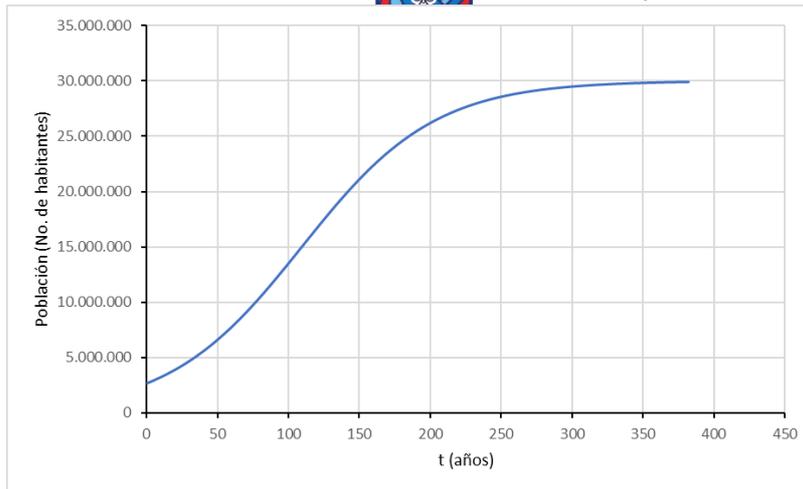


Gráfico 3. Curva Logística de población. Provincia de Pichincha.

5.6.2 Proyección del número de vehículos.

Se realizó adoptando el concepto de tasa de motorización T_m , que expresa el número de vehículos por cada 1000 habitantes. Este indicador es utilizado para efectos de identificar las tendencias de crecimiento del parque automotor en general, en función del crecimiento poblacional y efectuar las proyecciones respectivas.

La hipótesis fundamental en la cual se basan las proyecciones de tráfico futuro es que existe una relación directa entre el número de vehículos de la región (provincia) y el volumen de tráfico de las vías, adicionalmente se asume que la tasa de utilización de los vehículos que se incorporan al parque automotor año a año no varía. En este sentido, cualquier incremento en el tamaño del parque automotor reflejará un incremento igual en el uso de los vehículos y por ende en el volumen de tráfico en las vías y carreteras.

El incremento en el tamaño del parque automotor – para los vehículos livianos – sigue un proceso en el cual se identifica la aspiración generalizada de la población de adquirir su vehículo propio y que la satisfacción de esta aspiración se cubre a medida que los ingresos disponibles así lo permiten. Por otro lado, existe una relación similar que relaciona la necesidad de transportar la carga de distinta índole que puede también relacionarse con la población.

Se considera el crecimiento de la tasa de motorización como un indicativo del crecimiento del tráfico; tomando en cuenta que esta tasa no crece indefinidamente en el tiempo y asemejando su comportamiento al de una curva logística, similar a la obtenida para la proyección poblacional.

La tasa de motorización, al igual que la población, no crece indefinidamente con el tiempo, presentando un comportamiento que obedece al modelo logístico, empleado para las proyecciones poblacionales. La ecuación por emplear en este caso es:

$$T_m(\text{ajuste}) = \frac{T_s \cdot T_i}{(T_s - T_i)e^{-rt} + T_i}; \quad (3)$$

, en la cual: T_s = tasa de motorización de saturación; T_i = tasa de motorización en el año base (2010); e = base de los logaritmos naturales, $T_{m\text{ajuste}}$ = tasa de motorización ajustada.

Tasas de proyección para vehículos livianos y para buses.

En la tabla que sigue, se registra el número de vehículos livianos matriculados en la provincia de Pichincha, de acuerdo con las estadísticas de transporte ESTRA publicadas por el (INEC, Estadísticas de Transporte ESTRA, 2024).

Tabla 9. Vehículos livianos matriculados. Provincia de Pichincha (fuente: ESTRA, INEC)

AÑO	<i>t</i> (años)	Veh. liv. matriculados PROV. PICHINCHA
2010	0	274.397
2011	1	291.448
2012	2	333.622
2013	3	359.550
2014	4	393.446
2015	5	443.211
2016	6	574.576
2017	7	465.584
2018	8	491.231
2019	9	476.080
2020	10	482.885
2021	11	489.690

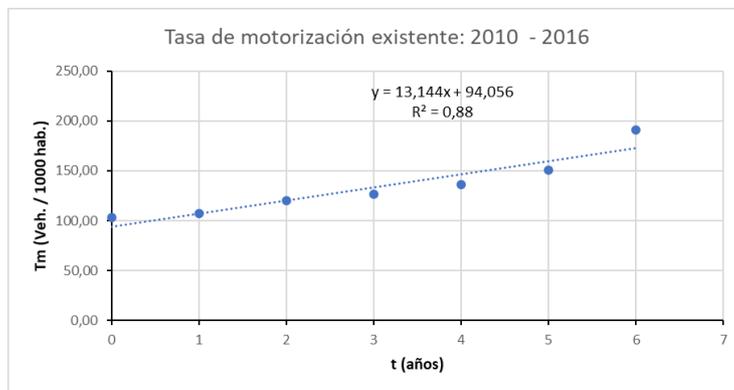


Gráfico 4. Crecimiento del No. De vehículos livianos. Provincia de Pichincha.

Las tasas de crecimiento anual *r*, se calcularon mediante (1). La tasa para el año base 2010 (*t* =0), se determinó mediante regresión lineal: haciendo *t*=0 en la ecuación de regresión (gráfico 5):

<i>t</i>	<i>Tm</i>	<i>r</i>
0	94,06	0,15
1	107,20	0,1397
2	120,34	0,1226
3	133,49	0,1092
4	146,63	0,0985

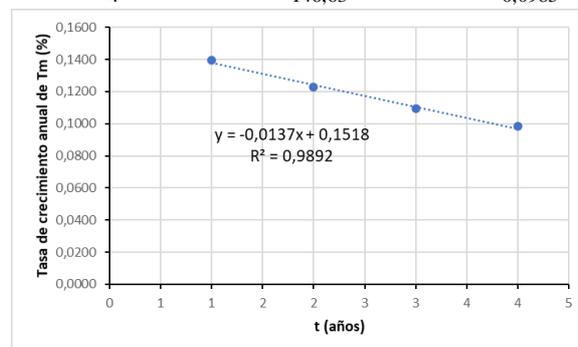


Gráfico 5. Tasa de crecimiento anual de vehículos livianos.

En la tabla 9, se registra el número de habitantes y los vehículos livianos matriculados en la Provincia de Pichincha desde el 2010 hasta el 2020, con los que se calcularon las tasas de motorización existentes:

$$Tm(existente) = \frac{Veh. liv matr.}{Población} (1000); \quad (4)$$

El proceso de cálculo consistió en asumir una tasa de saturación T_s , para la cual, la curva se vuelve asintótica en el período de diseño seleccionado ($n = 10$ años), esto es, en el año 2034.

Los vehículos matriculados se calcularon mediante:

$$Vehículos matriculados calculados = Tm_{(ajuste)} \times (No. hab) / 1000; \quad (5)$$

Las tasas de crecimiento de vehículos se calcularon mediante (1), la cual se ha representado por i , para cada 5 años. La tabla que sigue registra los cálculos realizados:

Tabla 10. Proyección de la tasa de motorización, tasa poblacional y número de vehículos livianos.

VEHICULOS LIVIANOS

AÑO	t (años)	Veh. liv. matriculados PROV. PICHINCHA	Población Prov. PICHINCHA	Tm (existente)	Ts (asumido)	Ti	Tasa r de crecim año base	Tm (ajuste)	Veh. Matric. Calculados
2010	0	274.397	2.667.953	102,85	152,00	102,85	0,15	103,00	274.799
2011	1	291.448	2.723.509	107,01				108,00	294.139
2012	2	333.622	2.779.370	120,04				113,00	314.069
2013	3	359.550	2.835.373	126,81				117,00	331.739
2014	4	393.446	2.891.472	136,07				121,00	349.868
2015	5	443.211	2.947.627	150,36				125,00	368.453
2016	6	574.576	3.003.799	191,28				128,00	384.486
2017	7	465.584	3.059.971	152,15				131,00	400.856
2018	8	491.231	3.116.111	157,64				133,00	414.443
2019	9	476.080	3.172.200	150,08				136,00	431.419
2020	10	482.885	3.228.233	149,58				138,00	445.496
2021	11	489.690	3.294.990	148,62				140,00	461.299
2022	12		3.357.986					141,00	473.476
2023	13		3.422.032					143,00	489.351
2024	14		3.487.139					144,00	502.148
2025	15		3.553.320					145,00	515.231
2026	16		3.620.585					146,00	528.605
2027	17		3.688.946					147,00	542.275
2028	18		3.758.414					148,00	556.245
2029	19		3.829.000					148,00	566.692
2030	20		3.900.714					149,00	581.206
2031	21		3.973.568					149,00	592.062
2032	22		4.047.571					150,00	607.136
2033	23		4.122.734					150,00	618.410
2034	24		4.199.067					151,00	634.059

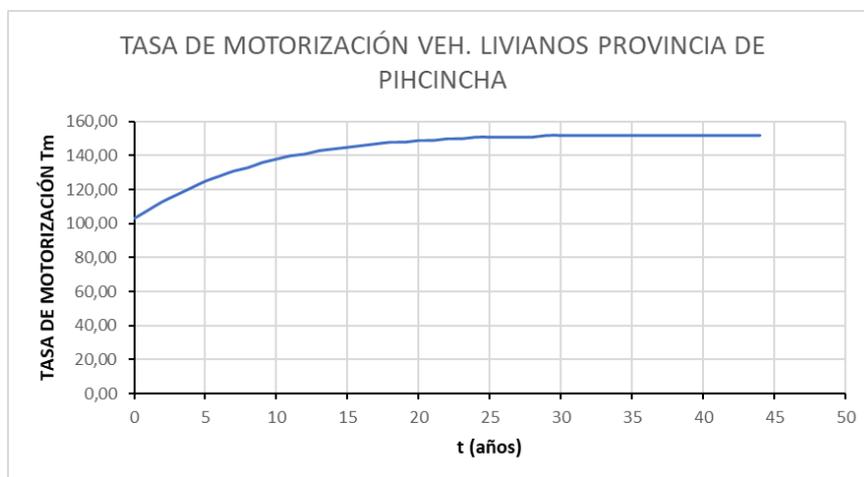


Gráfico 6. Modelo de proyección logístico para vehículos livianos.

La tasa de motorización de saturación resultó de 152 veh / 1000 hab. Las tasas de proyección en periodos de 5 años desde el 2024, se calcularon mediante (1) y se designaron por *i*. Se presentan en la tabla que sigue:

Tabla 11. Tasas de proyección de población=tasa buses y vehículos livianos.

Período (años)	Tasa de proyección población <i>i</i> (%)	Tasa de proyección veh. Livianos <i>i</i> (%)
2024 - 2029	1,90	2,45
2029 - 2034	1,86	2,27

Para proyectar el tránsito de buses (vehículos de pasajeros), se empleó la tasa de crecimiento de la población, ya que se considera que el número de buses obedece a la demanda de pasajeros.

Tasas de proyección para vehículos pesados (camiones y plataformas):

Se realizó el mismo proceso de cálculo, registrando en la tabla los vehículos pesados matriculados en la provincia de Pichincha. La tasa del año base se determinó de forma similar, y resultó de $r = 0,15$ %.

Tabla 12. Proyección de la tasa de motorización y número de vehículos pesados.

VEHÍCULOS PESADOS

AÑO	<i>t</i>	Veh. pesados matriculados PROV. PICHINCHA	POBLACIÓN PROV. PICHINCHA	<i>Tm</i> (existente)	<i>Ts</i> (asumido)	<i>Ti</i>	Tasa <i>r</i> de crecim año base	<i>Tm</i> (ajuste)	Veh. Matric. Calculados
2010	0	13601	2.667.953	5,10	16	5,10	0,150	5,10	13.607
2011	1	14298	2.723.509	5,25				5,70	15.524
2012	2	14158	2.779.370	5,09				6,20	17.232
2013	3	15082	2.835.373	5,32				6,80	19.281
2014	4	16297	2.891.472	5,64				7,40	21.397
2015	5	24.836	2.947.627	8,43				8,00	23.581
2016	6	38.340	3.003.799	12,76				8,60	25.833
2017	7	26.082	3.059.971	8,52				9,20	28.152
2018	8	28.414	3.116.111	9,12				9,80	30.538
2019	9	26.909	3.172.200	8,48				10,30	32.674
2020	10	23.403	3.228.233	7,25				10,90	35.188
2021	11	26.030	3.294.990	7,90				11,40	37.563
2022	12		3.357.986					11,90	39.960
2023	13		3.422.032					12,30	42.091
2024	14		3.487.139					12,70	44.287
2025	15		3.553.320					13,10	46.548
2026	16		3.620.585					13,50	48.878
2027	17		3.688.946					13,80	50.907
2028	18		3.758.414					14,00	52.618
2029	19		3.829.000					14,30	54.755
2030	20		3.900.714					14,50	56.560
2031	21		3.973.568					14,70	58.411
2032	22		4.047.571					14,90	60.309
2033	23		4.122.734					15,00	61.841
2034	24		4.199.067					15,20	63.826

La tasa de motorización saturada *Ts* resultó ser de 16 veh / 1000 hab.

El gráfico siguiente muestra la variación de la tasa hasta su nivel de saturación, en el año 2034.

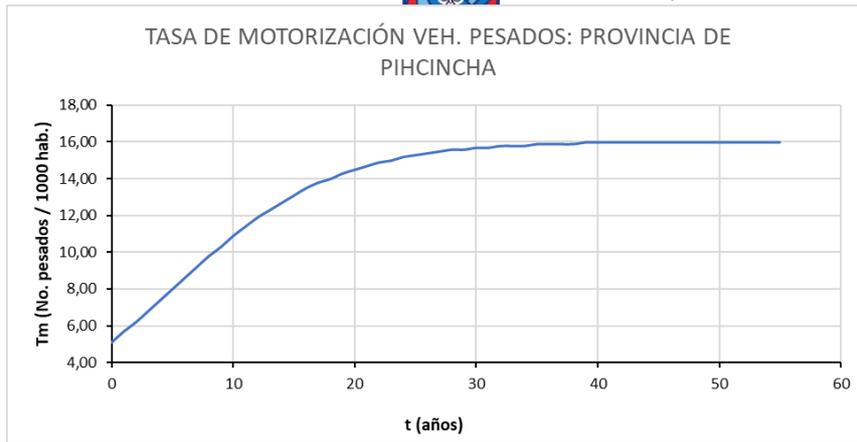


Gráfico 7. Modelo de proyección logístico para vehículos pesados.

Las tasas de proyección para pesados se calcularon mediante (1), y se presentan en la tabla siguiente:

Tabla 13. Tasas de proyección de población y vehículos pesados.

Período (años)	Tasa de proyección población <i>i</i> (%)	Tasa de proyección veh. Pesados <i>i</i> (%)
2024 - 2029	1,90	4,33
2029 - 2034	1,86	3,11

5.7 CÁLCULO DEL TPDA Y SUS PROYECCIONES.

El TPDA, o Tráfico Promedio diario anual, representa el tránsito total o número de vehículos que circulan por una sección de carretera, durante un año dividido para 365. Es decir, es el volumen de tránsito promedio por día (MTOPI, 2013).

Su cálculo, se efectuó a partir del tráfico observado $T_o = TPDs = \text{No veh} / (\text{días de conteo})$, afectado por los factores estacionales ya calculados.

$$TPDA = T_o \times (FH) \times (FD) \times (FS) \times (FM); \quad (6)$$

* Tráfico generado o atraído: es el producido por las mejoras en la vía, y se compone de los viajes que no se han incluido en los conteos manuales y automáticos, y por los viajes que optaban los conductores por otras rutas antes de las mejoras de la vía. Se calcula como un porcentaje del TPDA del primer año, y se estima como la mitad de los ahorros de los usuarios en el primer año, debido a las mejoras en la vía. Norma Ecuatoriana Vial NEVE-12 (MTOPI, 2013).

$$TG = (10\%) \times (TPDA_{\text{primer año}}), \text{ representa un ahorro del 20\% de los usuarios.} \quad (7)$$

El tráfico a un año t , se calculó mediante:

$$(TPDA)_f = (TPDA)_p(1 + i)^t; \quad (8)$$

, siendo: $TPDA_f$ = Tráfico promedio futuro; $TPDA_p$ = tráfico presente; t = no. años; i = tasa de proyección.

Con base en lo expuesto, se presenta el cálculo del TPDA, para cada estación de aforo, por cada tipo de vehículo, para intervalos de 5 años, como sigue:

5.7.1 TPDA Estación de aforo E1 (Intersección Av. Simón Bolívar, km 3+370)

PROYECCIONES TPDA VEHÍCULOS LIVIANOS

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA	
2.024		15.794	1,903	1,175	1,107	1,007		43.310	
2.029	5,00	TG = 10% (TPDA) primer año						2,45	48.877
2.034	5,00								

PROYECCIONES TPDA PARA BUSETAS (2 ejes simples, eje posterior rueda simple)

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA	
2.024		602	1,903	1,175	1,107	1,007		1.651	
2.029	5,00	TG = 10% (TPDA) primer año						1,89	1.813
2.034	5,00								

PROYECCIONES TPDA PARA BUS COLECTIVO (2 ejes simples, eje posterior dual)

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA	
2.024		374	1,903	1,175	1,107	1,007		1.026	
2.029	5,00	TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado						1,89	1.127
2.034	5,00								

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C1

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA	
2.024		306	1,903	1,175	1,107	1,007		840	
2.029	5,00	TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado						4,33	1.039
2.034	5,00								

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C2

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA	
2.024		35	1,903	1,175	1,107	1,007		96	
2.029	5,00	TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado						4,33	119
2.034	5,00								

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C3

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		1	1,903	1,175	1,107	1,007		3
2.029	5,00						4,33	4
2.034	5,00						3,11	5
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C4

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		1	1,903	1,175	1,107	1,007		3
2.029	5,00						4,33	4
2.034	5,00						3,11	5
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA OTROS (MOTOS)

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		1.123	1,903	1,175	1,107	1,007		3.080
2.029	5,00						2,45	3.476
2.034	5,00						2,27	3.890
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

TIPO DE VEHÍCULO	TPDA_2034 (10 años)
Livianos	54.688
Busetas	1.989
Buses	1.236
C1	1.212
C2	139
C3	5
C4	5
Motos	3.890
TOTAL =	63.164

5.7.2 TPDA Estación de aforo E2 (Intersección Paseo San Francisco, km 8+300)

PROYECCIONES TPDA VEHÍCULOS LIVIANOS

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		15.296	1,969	1,408	1,107	1,007		52.006
2.029	5,00						2,45	58.691
2.034	5,00						2,27	65.669
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA BUSETAS (2 ejes simples, eje posterior rueda simple)

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		512	1,969	1,408	1,107	1,007		1.741
2.029	5,00						1,89	1.912
2.034	5,00						1,86	2.097
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA BUS COLECTIVO (2 ejes simples, eje posterior dual)

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		385	1,969	1,408	1,107	1,007		1.309
2.029	5,00						1,89	1.438
2.034	5,00						1,86	1.577
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C1

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		400	1,969	1,408	1,107	1,007		1.360
2.029	5,00						4,33	1.682
2.034	5,00						3,11	1.961
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C2

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		14	1,969	1,408	1,107	1,007		48
2.029	5,00						4,33	60
2.034	5,00						3,11	70
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C3

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		1	1,969	1,408	1,107	1,007		4
2.029	5,00						4,33	5
2.034	5,00						3,11	6
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C4

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		26	1,969	1,408	1,107	1,007		89
2.029	5,00						4,33	111
2.034	5,00						3,11	130
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA OTROS (MOTOS)

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA				
2.024		993	1,969	1,408	1,107	1,007		3.377				
2.029	5,00	TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado						2,45	3.812			
2.034	5,00										2,27	4.266

TIPO DE VEHÍCULO	TPDA_2034 (10 años)
Livianos	65.669
Busetas	2.097
Buses	1.577
C1	1.961
C2	70
C3	6
C4	130
Motos	4.266
TOTAL =	75.776

5.7.3 TPDA Estación de aforo E3 (Intervalles, km 11+400)

PROYECCIONES TPDA VEHÍCULOS LIVIANOS

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA				
2.024		14.564	1,985	1,324	1,107	1,007		46.941				
2.029	5,00	TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado						2,59	53.333			
2.034	5,00										2,13	59.273

PROYECCIONES TPDA PARA Busetas (2 ejes simples, eje posterior rueda simple)

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA				
2.024		401	1,985	1,324	1,107	1,007		1.293				
2.029	5,00	TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado						1,89	1.420			
2.034	5,00										1,86	1.558

PROYECCIONES TPDA PARA BUS COLECTIVO (2 ejes simples, eje posterior dual)

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA				
2.024		549	1,985	1,324	1,107	1,007		1.770				
2.029	5,00	TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado						1,89	1.944			
2.034	5,00										1,86	2.132

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C1

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA				
2.024		408	1,985	1,324	1,107	1,007		1.316				
2.029	5,00	TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado						4,17	1.615			
2.034	5,00										3,11	1.883

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C2

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		15	1,985	1,324	1,107	1,007		49
2.029	5,00						4,17	61
2.034	5,00						3,11	72
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C3

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		1	1,985	1,324	1,107	1,007		4
2.029	5,00						4,17	5
2.034	5,00						3,11	6
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA CAMIÓN C4

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		4	1,985	1,324	1,107	1,007		13
2.029	5,00						4,17	16
2.034	5,00						3,11	19
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

PROYECCIONES TPDA PARA OTROS (MOTOS)

AÑO	TIEMPO t	To	FH	FD	FS	FM	Tasa i (%)	TPDA
2.024		1.538	1,985	1,324	1,107	1,007		4.958
2.029	5,00						2,59	5.634
2.034	5,00						2,13	6.262
TG = 10% (TPDA) primer año TPDA_2024 = 1,10 x TPDA calculado								

TIPO DE VEHÍCULO	TPDA_2034 (10 años)
Livianos	59.273
Busetas	1.558
Buses	2.132
C1	1.883
C2	72
C3	6
C4	19
Motos	6.262
TOTAL =	71.205

5.8 CÁLCULO DEL NUMERO DE EJES SIMPLES EQUIVALENTES AL EJE DE 8,2 ton (ESAL).

Este parámetro es normalmente designado por ESAL por sus siglas en inglés. Representa el número de pasadas de ejes, que producirán un daño en el pavimento, equivalente al que produciría el paso de un eje de 8,2 ton. La fórmula para su cálculo es proporcionada por (AASHTO, 1993) y es:

$$ESAL (diseño) = (TPDA) \times (D_L)(D_d) \times 365 \times (FC); \quad (9)$$

En (9):

TPDA = Tráfico promedio diario anual

D_L = Factor de carril

D_d = Factor direccional.

FC = Factor camión

El factor 365, se aplica para llevar el TPDA a un año.

5.8.1 CÁLCULO DEL FACTOR CAMIÓN

El cálculo de este parámetro se realiza partiendo del factor de equivalencia de carga o FEC, el cual depende del tipo de vehículo.

El factor camión, es la sumatoria de los factores de equivalencia de carga de los ejes de un vehículo determinado.

Para el cálculo de los factores de equivalencia de carga se ha optado por el criterio de la ley de la cuarta potencia como recomienda (INVIAS, 1998), la cual se expresa mediante la relación:

$$FEC = \left(\frac{P_1}{P_0}\right)^4 ; \quad (10)$$

P_0 = Carga estándar en toneladas

P_1 = Carga cuya equivalencia se desea calcular en toneladas.

La carga P_0 depende del tipo de eje, de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 14. Carga estándar por tipo de eje según INVÍAS.

TIPO DE EJE	P_0 (ton)
Simple, rueda simple	6,60
Simple, rueda doble	8,20
Tándem	15,00
Trídem	23,00

Tabla 15. Cálculo de FEC y FC por tipología de vehículo.

TIPO DE VEHÍCULO	DESIGNACIÓN	TIPO DE EJE	CARGA P_1 (ton)	FEC	FC
BUSETAS	2D	Delantero Simple, rueda simple	3	0,043	0,178
		Posterior Simple, rueda simple	4	0,135	
BUS COLECTIVO	2DA	Delantero Simple, rueda simple	3	0,043	0,574
		Posterior Simple, rueda doble	7	0,531	
C1	2DB o V2DB	Delantero Simple, rueda simple	7	1,265	4,504
		Posterior Simple, rueda doble	11	3,238	
C2	3A o V3A	Delantero Simple, rueda simple	7	1,265	4,426
		Posterior Tándem	20	3,160	
C3	4C	Delantero Simple, rueda simple	7	1,265	2,451
		Posterior Trídem	24	1,186	
C4	2S2	Delantero Simple, rueda simple	7	1,265	7,664
		Posterior cabezal Simple, rueda doble	11	3,238	
		Posterior remolque Tándem	20	3,160	

CÁLCULO DE ESAL PARA ESTACIÓN DE AFORO E1

NO. DE CALZADAS = 2
 NO. DE CARRILES POR DIRECCIÓN = 3
 FACTOR DE CARRIL DL = 0.6
 FACTOR DIRECCIONAL Dd = 0.5
 (AASHTO, 1993 [4])

$$ESAL \text{ (diseño)} = (TPDA) \times (D_c) \times 365 \times (FC)$$

AÑO	TPDA										FC					ESAL diseño acumulado
	Tasa de crecimiento f (%)					BUSES					PESADOS (CAMIONES)					
	BUSES	CAMIONES	BUSETAS	BUS COLECTIVO	C1	C2	C3	C4	BUSETA	BUS COLECTIVO	C1	C2	C3	C4		
2024	1.89	4.33	1.651	1.026	840	96	3	3	0.178	0.574	4.504	4.426	2.451	7.664	560.659,65	
2029	1.89	4.33	1.813	1127	1039	119	4	4	0.178	0.574	4.504	4.426	2.451	7.664	680.546,45	
2034	1.86	3.11	1.989	1236	1212	139	5	5	0.178	0.574	4.504	4.426	2.451	7.664	786.932,32	

ESAL estación de aforo E1 = 2.028.138,42

CÁLCULO DE ESAL: ESTACIÓN DE AFORO E2

NO. DE CALZADAS = 2
 NO. DE CARRILES POR DIRECCIÓN = 3
 FACTOR DE CARRIL DL = 0.6
 FACTOR DIRECCIONAL Dd = 0.5
 (AASHTO, 1993 [4])

$$ESAL \text{ (diseño)} = (TPDA) \times (D_c) \times 365 \times (FC)$$

AÑO	TPDA										FC					ESAL diseño acumulado
	Tasa de crecimiento f (%)					BUSES					PESADOS (CAMIONES)					
	BUSES	CAMIONES	BUSETAS	BUS COLECTIVO	C1	C2	C3	C4	BUSETA	BUS COLECTIVO	C1	C2	C3	C4		
2024	1.89	4.33	1.741	1.309	1.360	48	89	89	0.178	0.574	4.504	4.426	2.451	7.664	885.806,66	
2029	1.89	4.33	1.912	1438	1682	60	111	111	0.178	0.574	4.504	4.426	2.451	7.664	1.080.577,79	
2034	1.86	3.11	2.097	1577	1961	70	130	130	0.178	0.574	4.504	4.426	2.451	7.664	1.251.557,06	

ESAL_ diseño estación de aforo E2 = 3.217.941,51

CÁLCULO DE ESAL: ESTACIÓN DE AFORO E3

NO. DE CALZADAS = 2
 NO. DE CARRILES POR DIRECCIÓN = 2
 FACTOR DE CARRIL DL = 1
 FACTOR DIRECCIONAL Dd = 0,5
 (AASHTO, 1993 [4])

$$ESAL_{(diseño)} = (TPDA) \times (D_c) \times (D_d) \times 365 \times (FC)$$

AÑO	Tasa de crecimiento / (%)			TPDA BUSES				TPDA PESADOS (CAMIONES)				FC				ESAL diseño	ESAL diseño acumulado
	BUSES	CAMIONES		BUSETAS	BUS COLECTIVO	C1	C2	C3	C4	BUSETA	BUS COLECTIVO	C1	C2	C3	C4		
2024	1,89	4,33		1.293	1.770	1.316	49	4	13	0,178	0,574	4.504	4.426	2.451	7.664	1.368.435,31	1.368.435,31
2029	1,86	3,11		1.420	1944	1628	61	5	17	0,178	0,574	4.504	4.426	2.451	7.664	1.662.943,66	3.031.378,96
2034				1.558	2132	1898	72	6	20	0,178	0,574	4.504	4.426	2.451	7.664	1.922.547,52	4.953.926,48

ESAL_diseño estación de aforo E3 = 4.953.926,48

El número de ejes equivalentes ESAL, se asignó por tramos, calculando los promedios de los ESAL respectivos entre cada estación, de la siguiente manera:

Estación de aforo	Abscisa	ESAL
E1	3+370	2.028.138,42
E2	8+300	3.217.941,51
E3	11+400	4.953.926,48

<u>Tramo</u>	<u>ESAL</u>
2+500 – 8+300	Prom. (E1 y E2) = 2.623.039,96
8+300 – 11+000	Porm. (E2 y E3) = 4.085.933,99
11+000 – 22+000	ESAL E3 = 4.953.926,48

Para el último tramo, se asigna el ESAL calculado para la estación E3, considerando que su influencia abarca hasta la población de Pifo.

6. EVALUACIÓN FUNCIONAL MEDIANTE EL ÍNDICE DE CONDICIÓN ACTUAL DEL PAVIMENTO (PCI).

6.1 INTRODUCCIÓN.

La evaluación funcional consiste en identificar el o los defectos que presenta el pavimento a nivel superficial, para definir acciones de reparación, que pueden orientarse a la corrección de la fricción (seguridad), o al restablecimiento de la rugosidad o regularidad (comodidad), lo cual se logra con la colocación de capas asfálticas de bajo espesor que no contribuyen desde el punto de vista estructural. No obstante, las opciones de reparación pueden consistir en obras de mayor alcance, si se identifican niveles de severidad elevados, indicativos de carencia estructural del pavimento.

Para la evaluación funcional se realizó el cálculo del Índice de Condición actual del pavimento o PCI, realizando el muestreo y el levantamiento de fallas con su nivel de severidad respectivo, con base en la norma (Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM D6433-18.)

6.2 MUESTREO PARA EL LEVANTAMIENTO DE FALLAS DEL PAVIMENTO.

Descripción de las variables y fórmulas empleadas (metodología norma ASTM D 6433-18)

Diseño de la muestra:

$$\text{Número total de muestras} \quad N = L_{\text{tramo}} / L_{\text{muestra}}$$

$$\text{Número mínimo de muestras} \quad n = \frac{N\sigma^2}{\frac{e^2}{4}(N-1) + \sigma^2}$$

σ = Desviación estándar. Se recomienda adoptar una desviación de 17

e = error permisible en el cálculo del PCI. Se recomienda adoptar el valor de 7

$$\text{Razón muestra (intervalo muestral)} = N / n$$

Proceso de cálculo:

$$\text{Densidad de falla:} \quad D = (C/A) \times 100$$

C = Cantidad medida de la falla observada

A = área de la muestra

Valor de deducción individual VD_i

Numero de valores de deducción en la muestra k

$$\text{Valor deducido total:} \quad VDT = \sum_i^k (VD)_i$$

Numero de Valores individuales deducidos > 2 q

$$\text{Número permitido de deducciones (incluida fracción)} \quad m = 1 + \frac{q}{98} [100 - \max(VDi)] \leq 10$$

Valor deducido total corregido VDC (obtenido a partir de q)

$$\text{Valor PCI} \quad PCI = 100 - \max(VDC)$$

$$\text{PCI promedio} \quad \overline{PCI} = \frac{\sum_{i=1}^n PCI_i}{n}$$

Tipos de Fallas	
1. Piel de cocodrillo	11. Parcheo
2. Exudación	12. Pulimiento de agregados
3. Agrietamiento en bloque	13. Baches
4. Hundimiento o Abultamiento	14. Cruce de vía férrea
5. Corrugación	15. Ahuellamiento
6. Depresión	16. Desplazamiento
7. Grieta de borde	17. Grieta parabólica (slippage)
8. Grieta de reflexión de junta	18. Hinchamiento
9. Desnivel de carril / berma	19. Desgaste
10. Grietas longitudinales y transversales	20. Desprendimiento de agregados

MUESTREO PARA EVALUACIÓN FUNCIONAL Y ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO: CÁLCULO DEL PCI

VÍA: INTEROCEÁNICA
INICIO : Plaza Argentina km 0+000
FINAL: Pifo km 21+500

LONGITUD DEL TRAMO	$L_{\text{tramo}} =$	20	km
LONGITUD DE LA MUESTRA	$L_{\text{muestra}} =$	20	m
NUMERO DE MUESTRAS	$N =$	1000	muestras
DESVIACIÓN ESTÁNDAR (inicial impuesta)	$\sigma =$	17	
ERROR PERMISIBLE EN LA ESTIMACIÓN DEL PCI	$e =$	7	
NUMERO MÍNIMO DE MUESTRAS	calculado $n =$	23	
	adoptado $n =$	23	
RAZÓN MUESTRAL	$N / n =$	43	

ABSCISA INICIAL DE EVALUACIÓN 2+600,00

ABSCISAS PARA LEVANTAMIENTO DE FALLAS, NIVELES DE SEVERIDAD Y CÁLCULO DEL PCI:

MUESTRA No:	1	2	3	4	5	6	7	8	9
ABSCISA km:	2+600,00	3+460,00	4+320,00	5+180,00	6+040,00	6+900,00	7+760,00	8+620,00	9+480,00

MUESTRA No:	10	11	12	13	14	15	16	17	18
ABSCISA km:	10+340,00	11+200,00	12+060,00	12+920,00	13+780,00	14+640,00	15+500,00	16+360,00	17+220,00

MUESTRA No:	19	20	21	22	23
ABSCISA km:	18+080,00	18+940,00	19+800,00	20+660,00	21+520,00

El levantamiento de fallas y niveles de severidad se realizó en ambas calzadas. En el Anexo 4 se detallan los cálculos del ÍNDICE PCI, en función de las fallas observadas y sus niveles de severidad. Los rangos de calificación del pavimento, mediante el PCI se muestran en la tabla siguiente:

**Tabla 6. Rangos de calificación.
RANGOS DE CALIFICACIÓN DEL PCI**

Rango	Clasificación
100 – 85	Excelente
85 – 70	Muy Bueno
70 – 55	Bueno
55 – 40	Regular
40 – 25	Malo
25 – 10	Muy Malo
10 – 0	Fallado

Los resultados se resumen en las tablas siguientes: Se realizó un análisis estadístico del PCI por calzada, para establecer el tipo de falla por abscisas, y la más frecuente. Los resultados serán relacionados con la evaluación estructural, que se expone en el numeral 7 del presente documento.

Tabla 16. Índice de condición actual del pavimento PCI. Calzada izquierda

CARRIL IZQUIERDO: SENTIDO PIFO - PLAZA ARGENTINA (QUITO)

MUESTRA No.	ABSCISAS	PCI	CONDICIÓN
1	2+580,00	85,0	MUY BUENO
2	3+440,00	25,4	POBRE
3	4+300,00	0,0	FALLADO
4	5+160,00	66,0	BUENO
5	5+900,00	4,0	FALLADO
6	6+880,00	8,0	FALLADO
7	7+740,00	0,0	FALLADO
8	8+600,00	8,0	FALLADO
9	9+460,00	71,9	MUY BUENO
10	10+320,00	14,1	MUY POBRE
11	11+200,00	0,0	FALLADO
12	12+040,00	42,0	REGULAR
13	12+900,00	13,0	MUY POBRE
14	13+760,00	38,0	POBRE
15	14+620,00	32,0	POBRE
16	15+480,00	38,0	POBRE
17	16+340,00	32,5	POBRE
18	17+200,00	32,0	POBRE
19	18+020,00	3,0	FALLADO
20	18+920,00	57,0	BUENO
21	20+680,00	8,0	FALLADO
22	21+540,00	40,0	POBRE
23	22+000,00	30,0	POBRE

PCI promedio=

CONDICIÓN=

σ =

28,2

POBRE

24,53

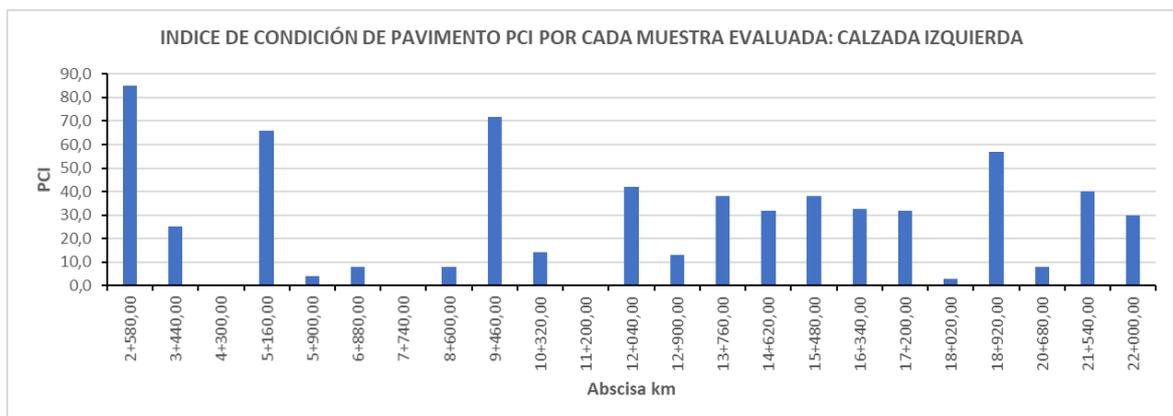


Gráfico 8.

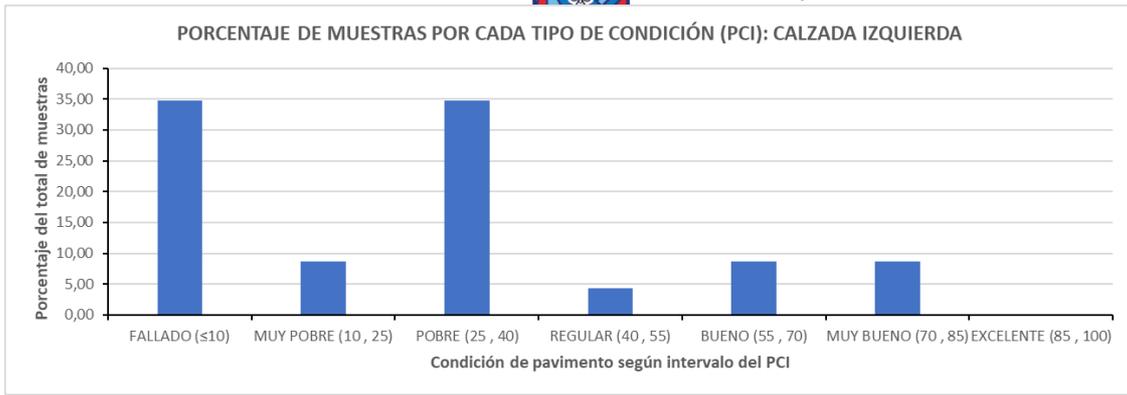


Gráfico 9.

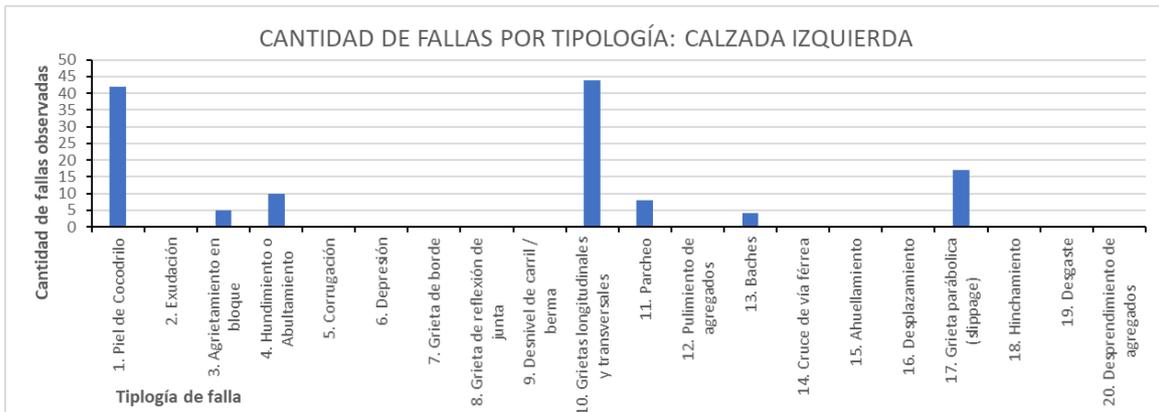


Gráfico 10.

A partir del km 10+300 se determinaron valores de PCI menores a 40 en la mayoría de las muestras (gráfico 8).

El 70% de las muestras indican: pavimento fallado a pobre (gráfico 9).

Las fallas más frecuentes son: 1. Piel de cocodrilo y 10. Grietas longitudinales y transversales (gráfico 10): 80 fallas observadas de ambos tipos. Causa probable, indican:

Tipo 1. Falla por fatiga de la carpeta asfáltica por las repeticiones de carga (Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM D6433-18.)

Tipo 10. Juntas de carril del pavimento pobremente construidas. Contracción de la superficie de concreto asfáltico debido a bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto o al ciclo diario de temperatura. Grietas reflejadas causadas por el agrietamiento bajo la capa de base (Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM D6433-18.)

Tabla 17. Índice de condición actual del pavimento PCI. Calzada derecha

MUESTRA No.	ABSCISA	PCI	CONDICIÓN
1	2+580,00	78	MUY BUENO
2	3+440,00	24	MUY POBRE
3	4+300,00	6,2	FALLADO
4	5+600,00	40	POBRE
5	6+000,00	7	FALLADO
6	6+880,00	32	POBRE
7	7+740,00	10	FALLADO
8	8+600,00	59	BUENO
9	9+460,00	19	MUY POBRE
10	10+320,00	0	FALLADO
11	11+180,00	38	POBRE
12	12+040,00	4	FALLADO
13	12+900,00	17	MUY POBRE
14	13+760,00	70	BUENO
15	14+620,00	71,5	MUY BUENO
16	15+480,00	85,5	EXCELENTE
17	16+340,00	82	MUY BUENO
18	17+200,00	28	POBRE
19	18+060,00	42,5	REGULAR
20	18+920,00	64	BUENO
21	19+600,00	83	MUY BUENO
22	20+680,00	13	MUY POBRE
23	21+540,00	36	POBRE
24	22+000,00	24	MUY POBRE
PCI_promedio=		38,90	
CONDICIÓN=		POBRE	
$\sigma =$		28,28	

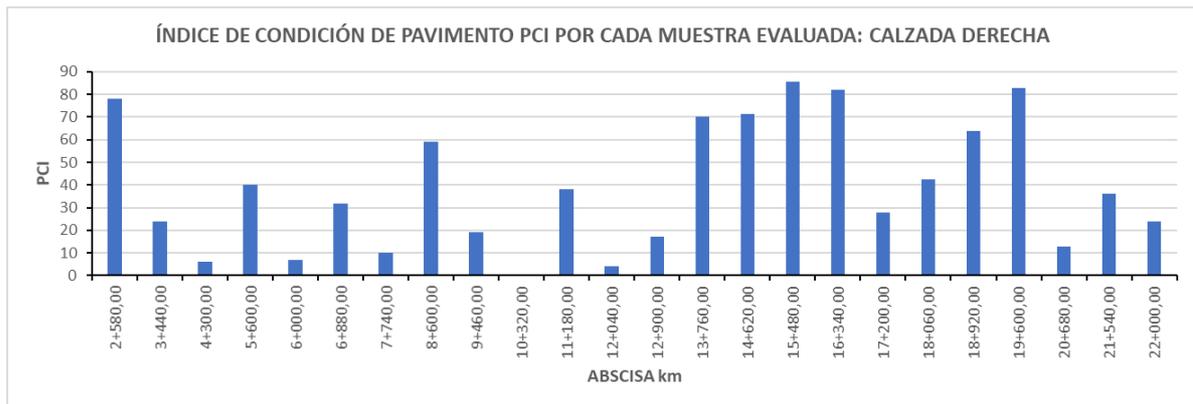


Gráfico 11.

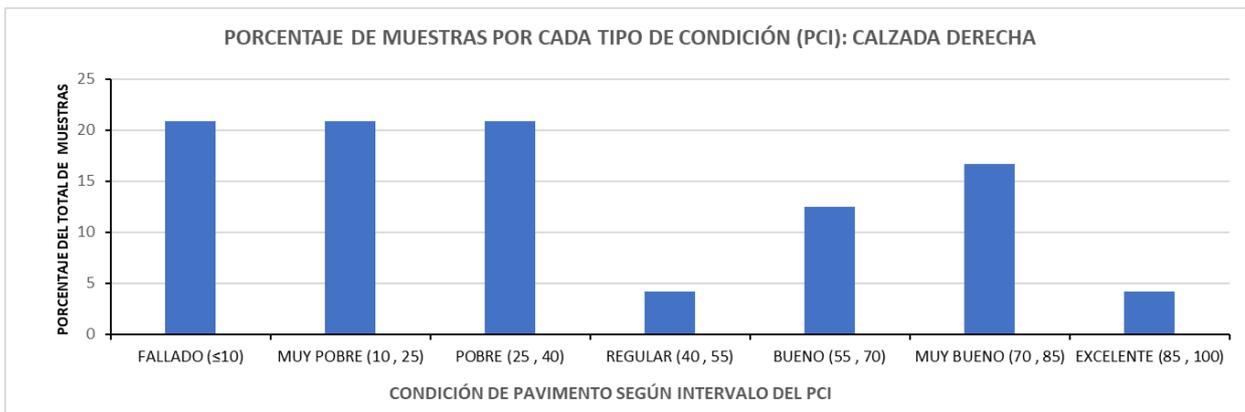


Gráfico 12.

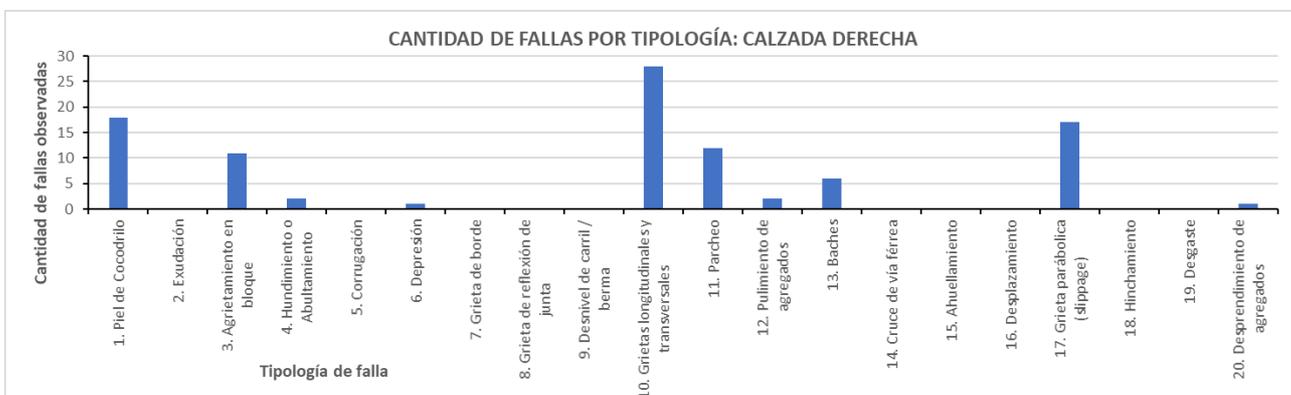


Gráfico 13.

Entre abscisas km 13+760 a 19+600 existen muestras con valores de PCI > 60 en su mayor parte (gráfico 11). Condición “bueno”.

El 60% de las muestras indican: pavimento fallado a pobre. Del 12 al 15% de las muestras presentaron condición de bueno a muy bueno ($55 < \text{PCI} < 85$) (gráfico 12).

Las fallas más frecuentes son: 1. Piel de cocodrilo (12 fallas). - 10. Grietas longitudinales y transversales (27 fallas). - 17 Grietas parabólicas o de deslizamiento (16 fallas), (gráfico 13): Causas más probables de las fallas frecuentes: Indican (Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM D6433-18.)

Tipo 1. Falla por fatiga de la carpeta asfáltica por las repeticiones de carga

Tipo 10. Juntas de carril del pavimento pobremente construidas. Contracción de la superficie de concreto asfáltico debido a bajas temperaturas o al endurecimiento del asfalto o al ciclo diario de temperatura. Grietas reflejadas causadas por el agrietamiento bajo la capa de base.

Tipo 17: grietas en forma de medialuna creciente. Son producidas cuando las ruedas que frenan o giran inducen el deslizamiento o la deformación de la superficie del pavimento. Usualmente, este daño ocurre en presencia de una mezcla asfáltica de baja resistencia, o de una liga pobre entre la superficie y la capa siguiente en la estructura de pavimento. Este daño no tiene relación alguna con procesos de inestabilidad geotécnica de la calzada.

Las desviaciones estándar calculadas del PCI, 24,53 y 28,28 calzadas izquierda y derecha respectivamente, se ajustan a la asumida para el muestreo, igual a 17, con un error de estimación de 7, que da como resultado, 24. Los resultados obtenidos con el muestreo realizado pueden considerarse apropiados.

7. EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DEL PAVIMENTO MEDIANTE ENSAYO DEFLECTOMÉTRICO CON VIGA BÉNKELMAN.

La evaluación estructural tiene por objeto determinar el nivel de capacidad portante o resistencia de las capas del pavimento y fallas en las mismas. Las fallas estructurales tienen su origen en defectos en una o más de las capas que conforman la estructura del pavimento, las cuales están destinadas a resistir y compartir los esfuerzos impuestos por el tráfico, de manera que a nivel de subrasante o suelo de fundación de pavimento

lleguen los menores esfuerzos y lo más distribuidos posible. En estos casos la corrección de las fallas va dirigida al refuerzo de la estructura existente mediante la colocación de una capa cuyo espesor debe ser calculado en función de los requerimientos de las cargas de tráfico previstas en el período de tiempo previsto para la rehabilitación.

La evaluación estructural del pavimento se realizó mediante deflectometría con la viga Békkelman, y consistió en una primera etapa con el trabajo de campo: medición de deflexiones a nivel de capa de rodadura bajo la aplicación de una carga de la rueda de un camión cuyo eje fue de 18000 libras (8,2 toneladas), medición y registro de la temperatura cada 2 km. La segunda etapa consistió en el procesamiento de los datos de campo en oficina, cálculo de la deflexión característica e identificación de zonas homogéneas y singulares (Criterio Español).

Se tomaron dos lecturas: deflexión máxima D_0 , y deflexión a 25 cm de la máxima, D_{25} , en centésimas de milímetro, las mismas que fueron corregidas por:

- Temperatura:

$$Kt = \frac{1}{[1+0,0008 h (T-20)]}; \quad (11)$$

h = espesor de la carpeta asfáltica existente, en cm.

T = temperatura de la carpeta asfáltica, en °C.

- Carga:

$$Kc = \sqrt{\frac{p_c P_c}{pP}}; \quad (12)$$

P_c y p_c : carga del eje y presión de inflado de rueda, del camión estándar

P y p : carga del eje y presión de inflado de rueda del camión para el ensayo.

- Constante de la viga: Se utilizó una viga con la constante convencional: $Kv = 4$.

- Clima: Se adoptó el factor de 1,8, correspondiente para clima seco y subrasante arcillosa, conforme a la siguiente tabla:

TIPO DE SUBRASANTE	CLIMA		
	LLUVIOSO	INTERMEDIO	SECO
Suelo arenoso, permeable	1,0	1 - 1,1	1,1 - 1,3
Suelo arcilloso, impermeable	1,0	1,1 - 1,3	1,5 - 1,8

El radio de curvatura de la deformada se calculó mediante:

$$Rc = \frac{6250}{2(D_0 - D_{25})}; \quad (13)$$

Rc = radio de curvatura, en m.

D_0 = deflexión máxima ($\times 10^{-2}$ mm)

D_{25} = deflexión a 25 cm de defl. Máxima ($\times 10^{-2}$ mm)

El procesamiento de la información se muestra en la tabla siguiente: en la misma, sentido L1: calzada izquierda (Pifo – Plaza Argentina) y L2: calzada derecha: (Plaza Argentina – Pifo)

Tabla 18. Procesamiento de deflexiones de campo.

SENTIDO: L1: Pizo - Tunel Guayasamín

L2: Tunel Guayasamín - Pifo

ABSCISA km:	Lect eje D ₀ (1/100 mm)	Lect a 25cm D ₂₅ (1/100 mm)	T (°C)	Clima	C	Kc	Kt	Kv	D _{0,corr} (1/100 mm)	D _{25,corr} (1/100 mm)	Rc (m)	SENTIDO
2+500,00	5	2	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	33,58	13,43	155,09	L1
2+600,00	5	2	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	36,00	14,40	144,68	L2
2+700,00	5	2	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	33,58	13,43	155,09	L1
2+800,00	4	2	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	28,80	14,40	217,01	L2
2+900,00	5	3	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	33,58	20,15	232,69	L1
3+000,00	5	3	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	36,00	21,60	217,01	L2
3+100,00	10	4	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	67,16	26,87	77,56	L1
3+200,00	9	6	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	64,80	43,20	144,68	L2
3+300,00	11	6	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	73,88	40,30	93,06	L1
3+400,00	11	8	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	79,20	57,60	144,68	L2
3+500,00	10	6	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	67,16	40,30	116,34	L1
3+600,00	12	8	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	86,40	57,60	108,51	L2
3+700,00	6	3	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	40,30	20,15	155,09	L1
3+800,00	7	4	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	50,40	28,80	144,68	L2
3+900,00	6	3	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	40,30	20,15	155,09	L1
4+000,00	8	5	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	57,60	36,00	144,68	L2
4+100,00	9	5	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	60,45	33,58	116,30	L1
4+200,00	8	5	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	57,60	36,00	144,68	L2
4+300,00	7	3	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	47,01	20,15	116,34	L1
4+400,00	9	4	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	64,80	28,80	86,81	L2
4+500,00	9	4	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	60,45	26,87	93,06	L1
4+600,00	17	14	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	122,40	100,80	144,68	L2
4+700,00	12	5	24,50	Seco	1,8	1,00	0,933	4,00	80,60	33,58	66,46	L1
4+800,00	18	10	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	129,60	72,00	54,25	L2
4+900,00	15	7	31,50	Seco	1,8	1,00	0,845	4,00	91,22	42,57	64,23	L1
5+000,00	11	7	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	79,20	50,40	108,51	L2
5+100,00	17	9	31,50	Seco	1,8	1,00	0,845	4,00	103,38	54,73	64,23	L1
5+200,00	17	8	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	122,40	57,60	48,23	L2
5+300,00	15	6	31,50	Seco	1,8	1,00	0,845	4,00	91,22	36,49	57,10	L1
5+400,00	9	6	19,00	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	64,80	43,20	144,68	L2
5+500,00	9	4	31,50	Seco	1,8	1,00	0,845	4,00	54,73	24,32	102,76	L1
5+600,00	9	5	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	64,80	36,00	108,51	L2
5+700,00	19	7	31,50	Seco	1,8	1,00	0,845	4,00	115,54	42,57	42,83	L1
5+800,00	7	4	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	50,40	28,80	144,68	L2
5+900,00	10	4	31,50	Seco	1,8	1,00	0,845	4,00	60,81	24,32	85,64	L1
6+000,00	10	4	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	72,00	28,80	72,34	L2
6+100,00	16	10	31,50	Seco	1,8	1,00	0,845	4,00	97,30	60,81	85,64	L1
6+200,00	16	8	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	115,20	57,60	54,25	L2



6+300,00	7	3	31,50	Seco	1,8	1,00	0,845	4,00	42,57	18,24	128,44	L1
6+400,00	13	10	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	93,60	72,00	144,68	L2
6+500,00	11	3	31,50	Seco	1,8	1,00	0,845	4,00	66,89	18,24	64,23	L1
6+600,00	9	5	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	64,80	36,00	108,51	L2
6+700,00	8	5	31,50	Seco	1,8	1,00	0,845	4,00	48,65	30,41	171,33	L1
6+800,00	9	6	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	64,80	43,20	144,68	L2
6+900,00	12	5	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	81,82	34,09	65,47	L1
7+000,00	5	3	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	36,00	21,60	217,01	L2
7+100,00	12	8	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	81,82	54,55	114,59	L1
7+200,00	11	8	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	79,20	57,60	144,68	L2
7+300,00	11	7	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	75,00	47,73	114,59	L1
7+400,00	12	9	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	86,40	64,80	144,68	L2
7+500,00	12	8	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	81,82	54,55	114,59	L1
7+600,00	7	5	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	50,40	36,00	217,01	L2
7+700,00	19	8	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	129,55	54,55	41,67	L1
7+800,00	10	7	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	72,00	50,40	144,68	L2
7+900,00	20	8	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	136,36	54,55	38,20	L1
8+000,00	8	5	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	57,60	36,00	144,68	L2
8+100,00	30	18	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	204,55	122,73	38,19	L1
8+200,00	8	4	19,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	57,60	28,80	108,51	L2
8+300,00	16	7	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	109,09	47,73	50,93	L1
8+400,00	8	5	24,00	Seco	1,8	1,00	0,940	4,00	54,14	33,83	153,87	L2
8+500,00	25	14	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	170,45	95,45	41,67	L1
8+600,00	7	4	24,00	Seco	1,8	1,00	0,940	4,00	47,37	27,07	153,94	L2
8+700,00	23	10	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	156,82	68,18	35,25	L1
8+800,00	14	11	24,00	Seco	1,8	1,00	0,940	4,00	94,74	74,44	153,94	L2
8+900,00	11	7	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	75,00	47,73	114,59	L1
9+000,00	18	10	24,00	Seco	1,8	1,00	0,940	4,00	121,80	67,67	57,73	L2
9+100,00	15	8	28,50	Seco	1,8	1,00	0,880	4,00	95,07	50,70	70,43	L1
9+200,00	10	4	24,00	Seco	1,8	1,00	0,940	4,00	67,67	27,07	76,97	L2
9+300,00	10	3	28,50	Seco	1,8	1,00	0,880	4,00	63,38	19,01	70,43	L1
9+400,00	11	7	24,00	Seco	1,8	1,00	0,940	4,00	74,44	47,37	115,44	L2
9+500,00	8	4	28,50	Seco	1,8	1,00	0,880	4,00	50,70	25,35	123,27	L1
9+600,00	12	9	24,00	Seco	1,8	1,00	0,940	4,00	81,20	60,90	153,94	L2
9+700,00	9	5	28,50	Seco	1,8	1,00	0,880	4,00	57,04	31,69	123,27	L1
9+800,00	11	8	24,00	Seco	1,8	1,00	0,940	4,00	74,44	54,14	153,94	L2
9+900,00	20	11	28,50	Seco	1,8	1,00	0,880	4,00	126,76	69,72	54,79	L1
10+000,00	14	9	24,00	Seco	1,8	1,00	0,940	4,00	94,74	60,90	92,35	L2
10+100,00	13	5	28,50	Seco	1,8	1,00	0,880	4,00	82,39	31,69	61,64	L1
10+200,00	8	4	30,00	Seco	1,8	1,00	0,862	4,00	49,66	24,83	125,86	L2
10+300,00	16	6	28,50	Seco	1,8	1,00	0,880	4,00	101,41	38,03	49,31	L1
10+400,00	9	5	30,00	Seco	1,8	1,00	0,862	4,00	55,86	31,03	125,86	L2
10+500,00	16	7	28,50	Seco	1,8	1,00	0,880	4,00	101,41	44,37	54,79	L1
10+600,00	19	10	30,00	Seco	1,8	1,00	0,862	4,00	117,93	62,07	55,94	L2
10+700,00	25	12	28,50	Seco	1,8	1,00	0,880	4,00	158,45	76,06	37,93	L1
10+800,00	12	9	30,00	Seco	1,8	1,00	0,862	4,00	74,48	55,86	167,83	L2
10+900,00	7	4	28,50	Seco	1,8	1,00	0,880	4,00	44,37	25,35	164,30	L1
11+000,00	18	14	30,00	Seco	1,8	1,00	0,862	4,00	111,72	86,90	125,91	L2
11+100,00	5	3	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	34,09	20,45	229,11	L1
11+200,00	12	9	30,00	Seco	1,8	1,00	0,862	4,00	74,48	55,86	167,83	L2
11+300,00	11	5	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	75,00	34,09	76,39	L1
11+400,00	5	3	30,00	Seco	1,8	1,00	0,862	4,00	31,03	18,62	251,81	L2
11+500,00	9	5	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	61,36	34,09	114,59	L1
11+600,00	12	9	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	66,67	50,00	187,46	L2
11+700,00	7	4	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	47,73	27,27	152,74	L1
11+800,00	5	3	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	27,78	16,67	281,28	L2
11+900,00	8	5	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	54,55	34,09	152,74	L1
12+000,00	9	5	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	50,00	27,78	140,64	L2
12+100,00	10	4	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	68,18	27,27	76,39	L1
12+200,00	4	2	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	22,22	11,11	281,28	L2
12+300,00	8	5	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	54,55	34,09	152,74	L1
12+400,00	5	3	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	27,78	16,67	281,28	L2
12+500,00	6	4	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	40,91	27,27	229,11	L1



12+600,00	13	11	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	72,22	61,11	281,28	L2
12+700,00	10	4	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	68,18	27,27	76,39	L1
12+800,00	19	10	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	105,56	55,56	62,50	L2
12+900,00	8	5	23,50	Seco	1,8	1,00	0,947	4,00	54,55	34,09	152,74	L1
13+000,00	20	14	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	111,11	77,78	93,76	L2
13+100,00	8	3	36,50	Seco	1,8	1,00	0,791	4,00	45,57	17,09	109,73	L1
13+200,00	8	5	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	44,44	27,78	187,58	L2
13+300,00	11	4	36,50	Seco	1,8	1,00	0,791	4,00	62,66	22,78	78,36	L1
13+400,00	10	6	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	55,56	33,33	140,58	L2
13+500,00	6	4	36,50	Seco	1,8	1,00	0,791	4,00	34,18	22,78	274,12	L1
13+600,00	14	10	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	77,78	55,56	140,64	L2
13+700,00	8	4	36,50	Seco	1,8	1,00	0,791	4,00	45,57	22,78	137,12	L1
13+800,00	6	4	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	33,33	22,22	281,28	L2
13+900,00	7	4	36,50	Seco	1,8	1,00	0,791	4,00	39,87	22,78	182,86	L1
14+000,00	19	10	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	105,56	55,56	62,50	L2
14+100,00	13	7	36,50	Seco	1,8	1,00	0,791	4,00	74,05	39,87	91,43	L1
14+200,00	15	10	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	83,33	55,56	112,53	L2
14+300,00	11	5	36,50	Seco	1,8	1,00	0,791	4,00	62,66	28,48	91,43	L1
14+400,00	13	8	38,50	Seco	1,8	1,00	0,772	4,00	72,22	44,44	112,49	L2
14+500,00	7	3	36,50	Seco	1,8	1,00	0,791	4,00	39,87	17,09	137,18	L1
14+600,00	9	6	18,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	64,80	43,20	144,68	L2
14+700,00	9	6	36,50	Seco	1,8	1,00	0,791	4,00	51,27	34,18	182,86	L1
14+800,00	9	5	18,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	64,80	36,00	108,51	L2
14+900,00	11	5	36,50	Seco	1,8	1,00	0,791	4,00	62,66	28,48	91,43	L1
15+000,00	10	4	18,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	72,00	28,80	72,34	L2
15+100,00	6	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	36,24	18,12	172,46	L1
15+200,00	9	5	18,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	64,80	36,00	108,51	L2
15+300,00	10	4	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	60,40	24,16	86,23	L1
15+400,00	5	2	18,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	36,00	14,40	144,68	L2
15+500,00	6	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	36,24	18,12	172,46	L1
15+600,00	13	6	18,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	93,60	43,20	62,00	L2
15+700,00	8	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	48,32	18,12	103,48	L1
15+800,00	5	3	18,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	36,00	21,60	217,01	L2
15+900,00	9	5	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	54,36	30,20	129,35	L1
16+000,00	10	5	18,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	72,00	36,00	86,81	L2
16+100,00	11	5	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	66,44	30,20	86,23	L1
16+200,00	5	3	18,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	36,00	21,60	217,01	L2
16+300,00	10	4	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	60,40	24,16	86,23	L1
16+400,00	6	4	18,50	Seco	1,8	1,00	1,000	4,00	43,20	28,80	217,01	L2
16+500,00	6	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	36,24	18,12	172,46	L1
16+600,00	15	9	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	100,00	60,00	78,13	L2
16+700,00	7	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	42,28	18,12	129,35	L1
16+800,00	9	6	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	60,00	40,00	156,25	L2
16+900,00	9	5	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	54,36	30,20	129,35	L1
17+000,00	8	5	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	53,33	33,33	156,25	L2
17+100,00	8	5	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	48,32	30,20	172,46	L1
17+200,00	9	6	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	60,00	40,00	156,25	L2
17+300,00	10	6	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	60,40	36,24	129,35	L1
17+400,00	10	5	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	66,67	33,33	93,73	L2
17+500,00	8	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	48,32	18,12	103,48	L1
17+600,00	11	8	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	73,33	53,33	156,25	L2
17+700,00	12	7	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	72,48	42,28	103,48	L1
17+800,00	9	6	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	60,00	40,00	156,25	L2
17+900,00	10	5	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	60,40	30,20	103,48	L1
18+000,00	10	4	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	66,67	26,67	78,13	L2
18+100,00	6	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	36,24	18,12	172,46	L1
18+200,00	5	3	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	33,33	20,00	234,43	L2
18+300,00	10	5	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	60,40	30,20	103,48	L1
18+400,00	11	7	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	73,33	46,67	117,22	L2
18+500,00	8	4	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	48,32	24,16	129,35	L1
18+600,00	8	4	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	53,33	26,67	117,22	L2
18+700,00	7	4	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	42,28	24,16	172,46	L1
18+800,00	12	9	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	80,00	60,00	156,25	L2

18+900,00	6	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	36,24	18,12	172,46	L1
19+000,00	10	7	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	66,67	46,67	156,25	L2
19+100,00	5	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	30,20	18,12	258,69	L1
19+200,00	11	7	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	73,33	46,67	117,22	L2
19+300,00	10	5	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	60,40	30,20	103,48	L1
19+400,00	18	9	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	120,00	60,00	52,08	L2
19+500,00	10	4	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	60,40	24,16	86,23	L1
19+600,00	9	5	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	60,00	33,33	117,17	L2
19+700,00	20	10	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	120,81	60,40	51,73	L1
19+800,00	10	6	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	66,67	40,00	117,17	L2
19+900,00	10	5	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	60,40	30,20	103,48	L1
20+000,00	15	12	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	100,00	80,00	156,25	L2
20+100,00	9	5	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	54,36	30,20	129,35	L1
20+200,00	24	16	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	160,00	106,67	58,60	L2
20+300,00	7	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	42,28	18,12	129,35	L1
20+400,00	14	10	25,00	Seco	1,8	1,00	0,926	4,00	93,33	66,67	117,22	L2
20+500,00	6	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	36,24	18,12	172,46	L1
20+600,00	13	10	26,00	Seco	1,8	1,00	0,912	4,00	85,40	65,69	158,55	L2
20+700,00	6	4	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	36,24	24,16	258,69	L1
20+800,00	6	4	26,00	Seco	1,8	1,00	0,912	4,00	39,42	26,28	237,82	L2
20+900,00	7	5	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	42,28	30,20	258,69	L1
21+000,00	18	15	26,00	Seco	1,8	1,00	0,912	4,00	118,25	98,54	158,55	L2
21+100,00	6	4	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	36,24	24,16	258,69	L1
21+200,00	18	15	26,00	Seco	1,8	1,00	0,912	4,00	118,25	98,54	158,55	L2
21+300,00	7	4	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	42,28	24,16	172,46	L1
21+400,00	14	11	26,00	Seco	1,8	1,00	0,912	4,00	91,97	72,26	158,55	L2
21+500,00	11	4	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	66,44	24,16	73,91	L1
21+600,00	14	11	26,00	Seco	1,8	1,00	0,912	4,00	91,97	72,26	158,55	L2
21+700,00	6	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	36,24	18,12	172,46	L1
21+800,00	11	7	26,00	Seco	1,8	1,00	0,912	4,00	72,26	45,99	118,96	L2
21+900,00	6	3	32,00	Seco	1,8	1,00	0,839	4,00	36,24	18,12	172,46	L1
22+000,00	10	7	26,00	Seco	1,8	1,00	0,912	4,00	65,69	45,99	158,63	L2

Los resultados estadísticos para el tramo total fueron los siguientes:

$$\text{Deflexión media } \bar{D} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i}{n} = \underline{68,64}$$

$$\text{Desviación estándar } \sigma = \sqrt{\frac{\sum (D_i - \bar{D})^2}{n - 1}} = \underline{29,96}$$

$$\text{Deflexión característica } D_c = \bar{D} + 2\sigma = \underline{128,55}$$

$$\text{Coeficiente de variación } v = \sigma / \bar{D} = \underline{0,436424}$$

La deflexión característica representa la deflexión admisible del pavimento, para la cual se producirá su colapso definitivo.

El coeficiente de variación v , permite decidir la condición de homogeneidad del tramo. Un tramo se considera homogéneo si tiene un comportamiento esfuerzo - deformación uniforme. En el deflectograma, esto se interpreta cuando las deflexiones oscilan alrededor de la media. Según el criterio español, coeficientes de variación menores que 0,43 ó 0,45 son indicadores de homogeneidad.

De acuerdo con el **Criterio Español**, los tramos homogéneos, se definen como las abscisas para las cuales: $0,5x D_{media} < D_o < 1,5x D_{media}$. Los valores de deflexión que superan el límite $1,5 x D_{media}$, se consideran zonas singulares, en donde se deben realizar sondeos o calicatas para investigar el tipo de problemas que causaron las elevadas deflexiones y proponer las soluciones apropiadas. El **Criterio Francés**, evalúa el estado de la subrasante mediante el radio

de curvatura. Según este criterio, radios de curvatura menores a 100 m, indican mal estado de la subrasante (cuenco de deformación agudo).

7.1 DEFLECTOGRAMA. DEFLEXIÓN CARACTERÍSTICA DEL TRAMO TOTAL (INTERCAMBIADOR PLAZA ARGENTINA – PIZO). RADIOS DE CURVATURA.

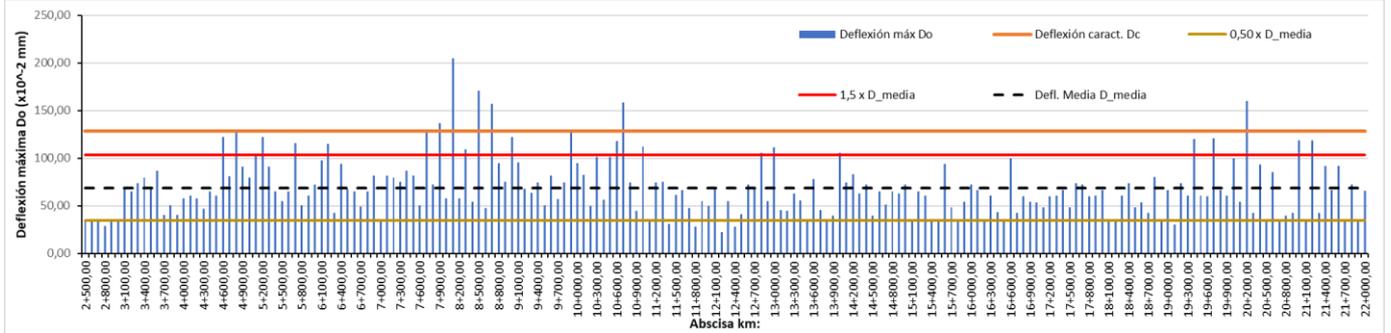


Gráfico 14. Deflectograma tramo total.

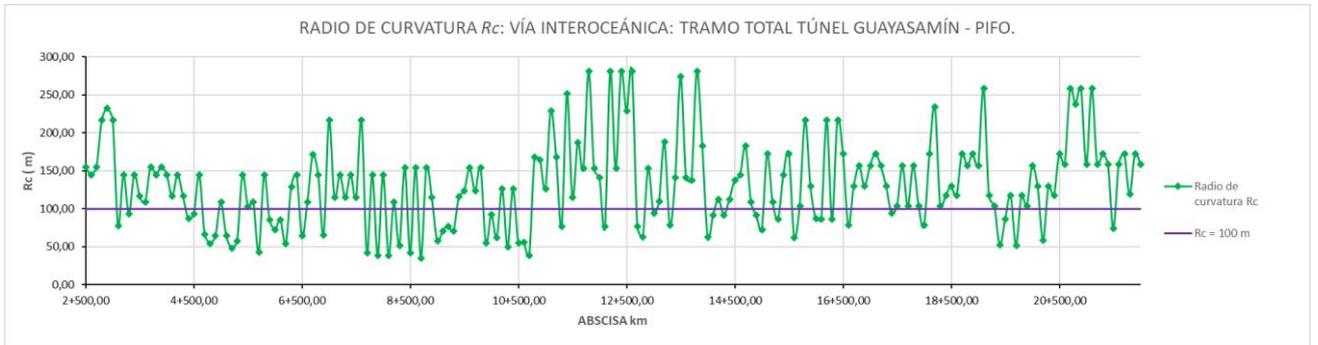


Gráfico 15. Radio de curvatura.

Como se aprecia, el tramo total no es homogéneo. Las deflexiones presentan varias discontinuidades a lo largo del mismo. El proceso riguroso exige realizar un nuevo muestreo para realizar el ensayo, sin embargo, es más factible realizar una tramificación y definir zonas homogéneas mediante observación del deflectograma y radios de curvatura:

Subtramo 1: 2+500 – 4+600: Se presentaron deflexiones relativamente bajas (menores a la media), con radios de curvatura $R_c > 100m$ en su mayor parte. Con la tramificación, se obtuvo el siguiente deflectograma y parámetros estadísticos:

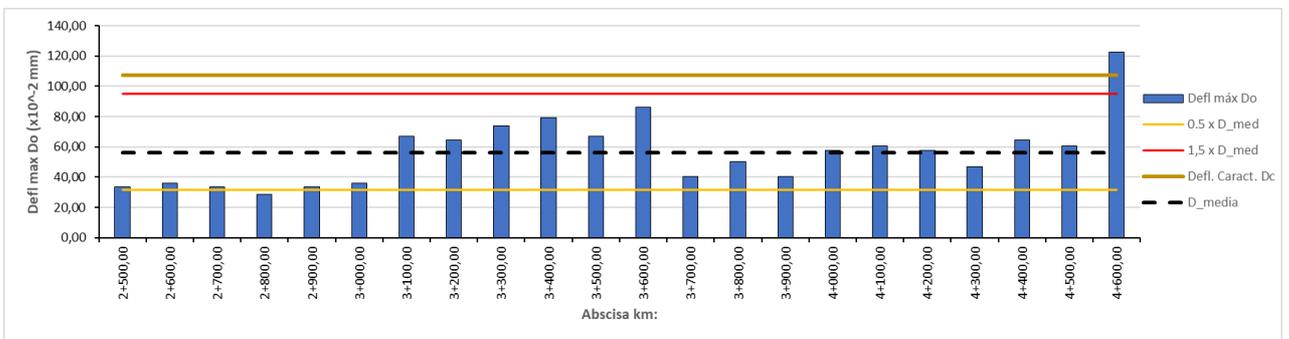


Gráfico 16. Tramificación 1: 2+500 – 4+600

\bar{D}	σ	$v = \sigma/\bar{D}$	D_c
63,29	22,13	0,35	107,56

Se puede apreciar que el coeficiente de variación v es menor que 0,40, indicativo de homogeneidad de acuerdo con el Criterio Español. Con base en este criterio, no se identificaron zonas singulares.

Subtramo 2: 4+600 – 11+000: Se presentaron deflexiones relativamente altas a partir del km 7+900 (mayores a $1,5 \times D_{media}$, incluso mayores a la característica), con radios de curvatura $R_c < 100m$ en su mayor parte. Con la tramificación se obtuvieron los siguientes resultados:

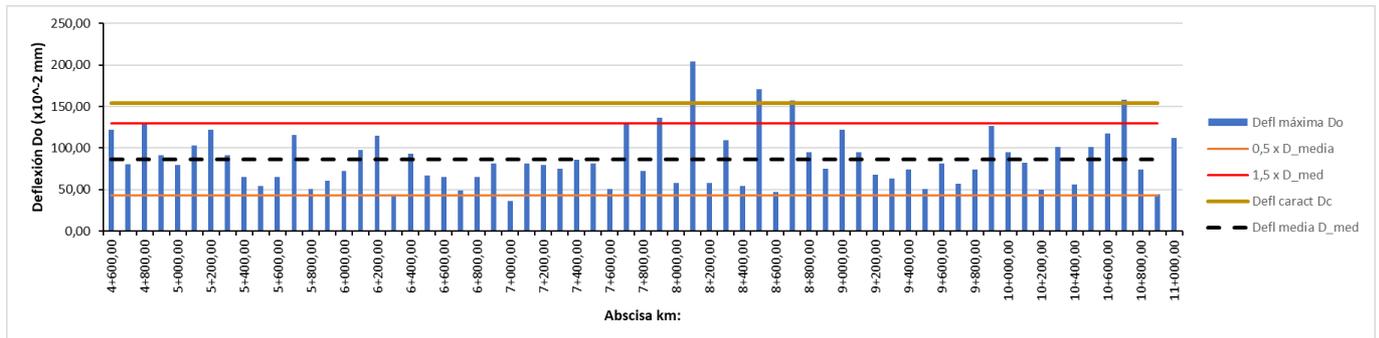


Gráfico 17: Sub tramo 2: 4+600 – 11+000.

\bar{D}	σ	$v = \sigma/\bar{D}$	D_c
86,21	33,75	0,39	153,70

Existen seis zonas singulares ($Do > 1,5 \times D_{med}$): km 7+900; 8+100; 8+500; 8+700; 9+900 y 10+700. Las citadas abscisas coinciden con valores del radio de curvatura menores a 100 m que, según el Criterio Francés se consideran críticos, indicativos de un cuenco de deformación agudo. Se descarta fatiga de la subrasante, ya que no se han reportado ahuellamientos en las fallas observadas (Anexo 4). La capa granular existente puede requerir refuerzo o estabilización mediante adición de emulsión o cemento. Se deben realizar calicatas para investigar el estado de estos materiales, y realizar los ensayos respectivos: CBR de subrasante, caracterización del material granular y clasificación mediante el sistema AASHTO.

Subtramo 3: 11+000 – 12+700: Se presentaron deflexiones relativamente bajas (menores al límite $1,5 \times D_{med}$), con radios de curvatura $R_c > 100m$ en su mayor parte. Los resultados se muestran en la gráfica con sus parámetros estadísticos:

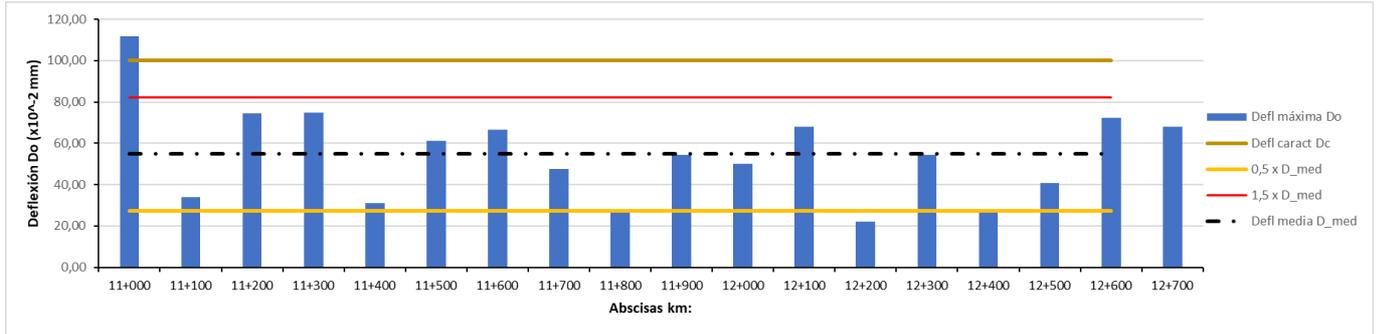


Gráfico 18. Subtramo 3: 11+000 – 12+700

\bar{D}	σ	$v = \sigma / \bar{D}$	Dc
54,91	22,57	0,41	100,06

Zona puramente homogénea conforme a los Criterios Español y Francés. No existen zonas singulares.

Subtramo 4: 12+700 – 19+300: deflexiones relativamente bajas (menores al límite 1,5xD_med), con radios de curvatura $R_c < 100m$ en su mayor parte. Los resultados se muestran en la gráfica con sus parámetros estadísticos:

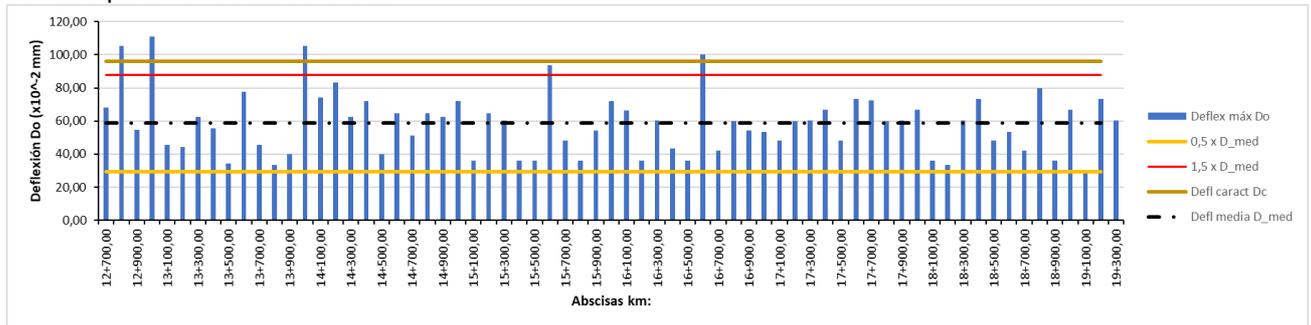


Gráfico 19. Subtramo 4. 12+700 – 19+300

\bar{D}	σ	$v = \sigma / \bar{D}$	Dc
58,69	18,68	0,32	96,05

El coeficiente de variación de 0,32, es indicativo de homogeneidad, aunque el subtramo no es puramente homogéneo. Existen 4 zonas singulares (muy puntuales y alejadas): km 12+800, 13+000, 14+000 y 16+600. En las abscisas citadas, se presentaron deflexiones mayores a 1,5xD_med, y se tienen radios de curvatura menores a 100m que indican una configuración aguda del cuenco de deformación. Se descarta fatiga o pérdida de soporte de la subrasante (no se reportaron ahuellamientos, Anexo 4). En estos puntos: posible refuerzo de la capa granular. Las causas de las deflexiones altas deben investigarse mediante calicatas. Con las muestras obtenidas, realizar ensayos de CBR de campo, y clasificación del suelo de la subrasante, y caracterización del material granular existente.

Subtramo 5: 19+300 – 22+000: deflexiones relativamente bajas en la mayor parte del subtramo (menores al límite 1,5xD_med), con radios de curvatura $R_c < 100m$ en su mayor parte. El cuenco de deformación se configura de corta longitud y poco profundo. Los resultados se muestran en la gráfica con sus parámetros estadísticos:

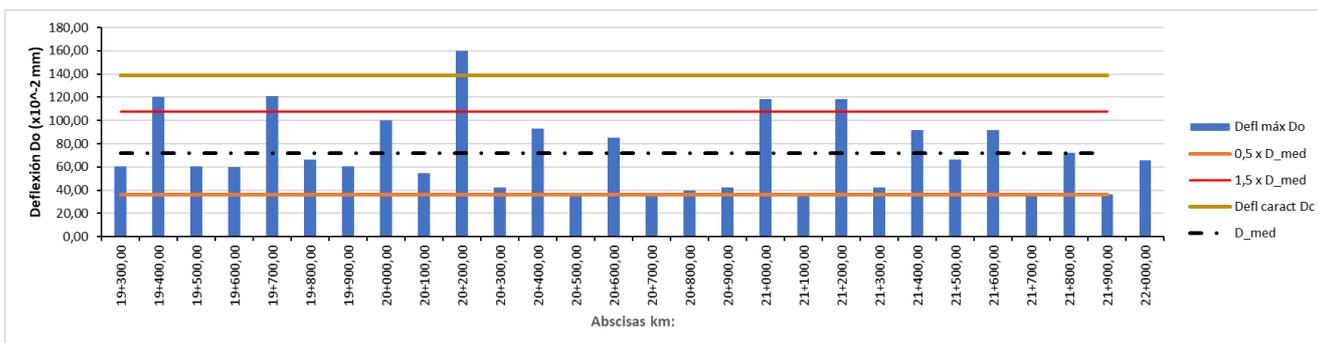


Gráfico 20. Subtramo 5: km 19+300 – 22+000.

\bar{D}	σ	$v = \sigma / \bar{D}$	Dc
71,93	33,33	0,46	138,58

El tramo es homogéneo, aunque existen dos zonas singulares, muy puntuales y alejadas: km 19+700 y km 20+200. Las abscisas citadas, coinciden con las abscisas donde se tienen radios de curvatura menores a 100m. Se descarta pérdida de soporte de la subrasante, dado que no se reportaron ahuellamientos en el levantamiento de fallas (Anexo 4). En estos puntos, la capa granular puede requerir refuerzo, o mejorar sus propiedades con un agente estabilizador. Las causas de las altas deflexiones deben investigarse mediante calicatas, para obtener muestras y realizar ensayos de CBR de campo y caracterización del material granular existente. Los resultados serán comparados con los obtenidos del cálculo basado en deflexiones, que se expone en el numeral 7 de este documento.

En las abscisas identificadas como singulares, se practicaron calicatas y extracción de núcleos de la carpeta asfáltica. Con las muestras obtenidas, se realizaron los siguientes ensayos (reporte de ensayos en Anexo 6):

- CBR de la subrasante. Método DCP de campo
- Clasificación de suelos mediante el sistema AASHTO y caracterización del material granular existente.
- Ensayos de extracción de asfalto en núcleos de carpeta asfáltica.
- Ensayos de compresión diametral para determinar los módulos de la carpeta existente.

Tabla 19. Resumen de abscisas (zonas singulares) para practicar calicatas

SUBTRAMO No.	ABSCISAS
2	7+900,00
	8+100,00
	8+500,00
	8+700,00
	9+900,00
	10+700,00
4	12+800,00
	13+000,00
	14+000,00
	16+600,00
5	19+700,00
	20+200,00
TYOTAL=	12 CALICATAS

7.2 RESUMEN DE RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE SUELOS.

7.2.1 CBR de la subrasante.

CALICATA No.	ABSCISA	CBR método DCP (%)
1	7+900,00	4
2	8+100,00	20
3	8+500,00	8
4	8+700,00	2
5	9+700,00	10
6	12+800,00	5
7	13+000,00	14
8	14+000,00	3
9	16+600,00	19
10	19+700,00	12
11	21+200,00	20

Los resultados de CBR son de carácter comprobatorio, de los resultados calculados mediante el modelo de Hogg desarrollado en el apartado 8. Puede apreciarse que los bajos valores de CBR en abscisas 8+700 (2%) y 14+000 (3%), se corresponden con deflexiones mayores a la característica (mayor a 1,65mm y a 1,13 mm respectivamente. Gráfico 17).

Los suelos de la subrasante tienen una elevada humedad natural: entre 11 a 26 %. La clasificación mediante el sistema AASHTO indica: suelos tipo A-2-4 (gravas y arenas limo arcillosas) y A-4 (suelos limosos), muy susceptibles ante incrementos de humedad.

7.2.2 Material granular existente.

Los ensayos de granulometría indican: material granular muy fino (km 14+000), materiales muy gruesos (km 8+100).

8. CÁLCULO DE MÓDULOS DE ELASTICIDAD DE LAS CAPAS DEL PAVIMENTO.

8.1 INTRODUCCIÓN: MÉTODO DE HOGG PARA CÁLCULO DE MÓDULOS.

Las deflexiones obtenidas mediante la viga Bénkelman se adecúan mejor al modelo de Hogg (Hoffman, Del Aguila, 1985).

Definición de los términos en las ecuaciones del modelo:

- Longitud característica l_0 :

La longitud característica refleja la rigidez relativa entre un pavimento y su subrasante.

Su cálculo depende de las deflexiones: D_0 (deflexión máxima), D_R (deflexión a una distancia R), y la distancia a la que fue tomada R .

El valor de la longitud característica varía en el orden de 15 a 80 cm, siendo el valor de $l_0 = 80$ cm representado por un pavimento rígido sobre una subrasante débil y el valor de $l_0 = 15$ cm en un pavimento débil sobre una fuerte subrasante. (Hoffman, Del Aguila, 1985).

- Módulo de elasticidad de la subrasante E_{sg} o E_o (la nomenclatura puede variar dependiendo de la fuente bibliográfica y autores que han modificado las ecuaciones). Este parámetro representa la capacidad de la subrasante de volver a su estado original después de aplicada una carga, es decir mide la flexibilidad del subsuelo que participa en la deformación del sistema pavimento subrasante (Hoffman, Del Aguila, 1985).

Para hallar su valor es necesario calcular la longitud característica l_0 . Este parámetro representa el punto central del modelo de Hogg.

- Profundidad de estrato rocoso o rígido. Se designa con H , y su utilidad radica en definir la relación H / l_0 , en base a la cual se emplean las ecuaciones del modelo.

CARACTERÍSTICAS DEL MODELO DE HOGG.

Hogg representa al pavimento en dos capas: una primera capa que es una placa delgada con una cierta rigidez a la flexión y horizontalmente infinita apoyada sobre una segunda capa perfectamente áspera, elástica, homogénea e isotrópica de espesor infinito o limitado por una base rígida (Hoffman, Del Aguila, 1985). La primera capa representa al paquete estructural y la segunda a la subrasante del pavimento (Hogg, 1944). Ver figura siguiente:

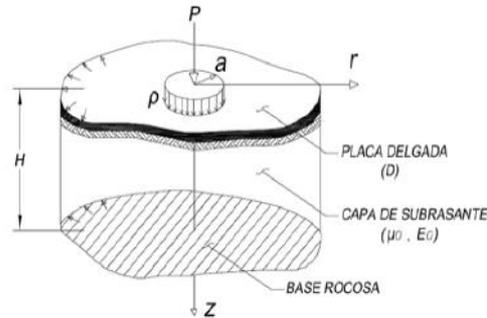


Figura 7.

La tabla que sigue, expone los parámetros que intervienen en el cálculo del módulo de elasticidad de la subrasante E_{sg}:

Tabla 20. Parámetros del modelo de Hogg

PARÁMETROS BÁSICOS DEL MODELO	$D = \frac{E_p * h_p^3}{12(1 - \mu_p^2)}$	Rigidez a la flexión de la placa (t - m)
	$L_0 = \left(\frac{D(1 + \mu_0)(3 - 4\mu_0)}{2(1 - \mu_0)E_{sg}} \right)^{\frac{1}{3}}$	Longitud característica (cm)
	E_{sg}	Módulo de elasticidad de la subrasante ($\frac{kg}{cm^2}$)
	μ_0	Módulo de Poisson de la subrasante (adimensional)
	H	Profundidad del estrato rocoso (cm)
Parámetros de Evaluación	L_0, E_{sg}, D	Se obtienen conociendo dos valores de deflexiones medidas

Las expresiones que se muestran corresponden a Hoffman (1977).

Los pavimentos tienen un comportamiento (performance) superficial y estructural. Durante su vida útil pueden sufrir fallas funcionales (superficiales) y fallas estructurales (en el paquete estructural). Este tipo de fallas en su estructura tienen influencia en su comportamiento funcional e incitar a fallas superficiales.

Las fallas estructurales son producidas por falta de cohesión entre los materiales que forman el paquete estructural "granular" de tal forma que no puede soportar las cargas de tránsito y también

por la falta de resistencia o deterioro de la subrasante. Estas fallas se relacionan con las deformaciones y deflexiones en el pavimento.

Las deflexiones y deformaciones del pavimento se encuentran relacionadas con los esfuerzos y deformaciones de compresión en la subrasante. Por tal motivo la capacidad portante a la que se encuentra la subrasante es un indicador significativo del comportamiento de un pavimento.

El modelo de Hogg permite caracterizar los materiales que conforman el sistema pavimento-subrasante, en base al análisis e interpretación de curvas de deflexiones. Para este modelo no se necesita conocer el espesor de las capas, esto es una gran ventaja del uso del modelo. Las deflexiones teóricas del modelo dependen solo de un parámetro llamado, longitud característica (l_0).

En conclusión, el modelo de Hogg permite obtener el módulo de elasticidad de la subrasante y con este valor poder hallar la capacidad portante (CBR) de ella, también permite establecer una necesidad de refuerzo.

El desarrollo del modelo se basa en el uso de las curvas de 2 nomogramas como los presentados en los gráficos siguientes.

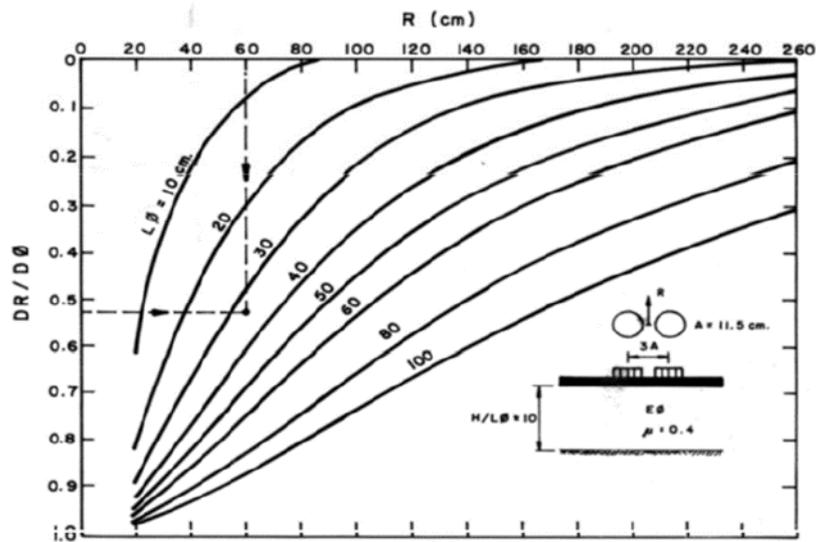


Gráfico 21. Nomograma para determinar la longitud característica l_0
(Fuente: Estudios de evaluación estructural de pavimentos. Hoffman y Del Águila, 1985)

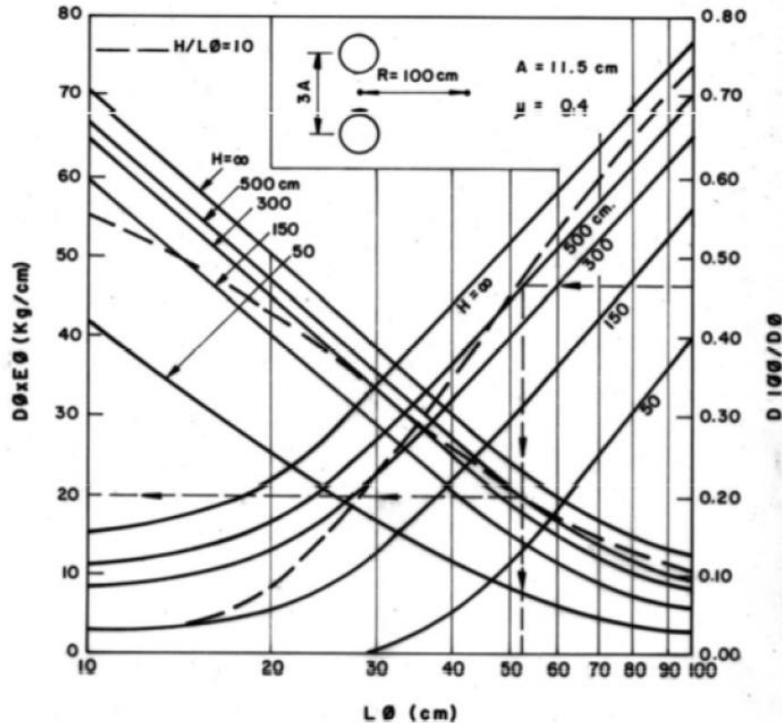


Gráfico 22. Nomograma para determinar la relación $D_o \times E_o$ (deflexión máxima por módulo de subrasante).

(Fuente: Estudios de evaluación estructural de pavimentos. Hoffman y Del Águila, 1985)

La ecuación de Hogg es posible resolverla mediante cálculo numérico.

El parámetro D (rigidez a la flexión de la placa) es utilizado en diferentes temas de análisis, pero en esta oportunidad no guarda relación con la metodología aplicada en este estudio. En tal caso para efecto de este trabajo solo es necesario obtener E_o o E_{sg} y l_o .

- Carga aplicada P : En el ensayo deflectométrico con viga Bénkelman, se aplicó la carga de la rueda del eje posterior del camión, que corresponde a la mitad del peso del eje. La presión de inflado del neumático ó p , junto con la carga aplicada P , permiten calcular el radio de la huella de la llanta, designado por A :

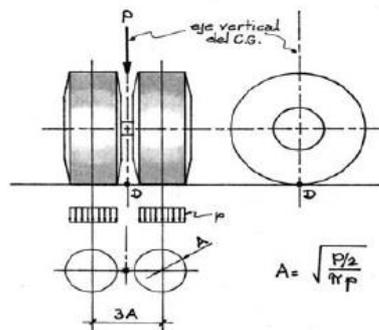


Figura 8.

El radio de la huella A , se calcula mediante:

$$A = \sqrt{\frac{P}{\pi p}}; \quad (14)$$

Donde:

A = Radio de huella.

P = Carga sobre una llanta.

p = Presión de inflado.

Como se estableció, en el modelo (Hogg) se tiene una variable H , que es la profundidad finita o infinita de una capa rígida (subrasante). En el procedimiento de evaluación es necesario limitar esta profundidad ya que, si no se limita, se diría que la extensión de las curvas de deflexiones (teórica) es infinita lo que se contradice con las deflexiones medidas. Para efectos de utilización del modelo de Hogg se sugiere que dicha profundidad sea 10 veces igual a la longitud característica ($H/l_0 = 10$) (Hoffman, Del Aguila, 1985).

8.2 CÁLCULO DE LA LONGITUD CARACTERÍSTICA l_0 .

El valor de l_0 es posible obtenerlo por medios matemáticos manuales. Cabe indicar que inicialmente en 1944 fue desarrollado el modelo de Hogg y en 1977 se obtuvieron las soluciones numéricas para obtener los parámetros de evaluación, empleando las siguientes ecuaciones (R.N. Stubstad, Y.J. Jiang, M.L. Clevenson, and E.O., Febrero, 2006) (*Wiseman et al, 1977*). Ver tabla 21.

Tabla 21. Parámetros y ecuaciones modelo de Hogg.

Parámetros de Evaluación- Método Numérico	Ecuación	
Módulo de elasticidad de la subrasante según Hogg.	$E_{sg} = I \frac{(1 + u_0)(3 - 4u_0)}{2(1 - u_0)} \left[\frac{S_0}{S} \right] \left[\frac{P}{D_0 \times L_0} \right]$	A
Distancia donde la deflexión es la mitad de la deflexión máxima.	$r_{50} = R \frac{\left(\frac{1}{\alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} - B}{\left[\frac{1}{\alpha} \left(\frac{D_0}{D_R} - 1 \right) \right]^{\frac{1}{\beta}} - B}$	B
Longitud característica de la curva de deflexión.	$L_0 = \frac{y_0 r_{50} + [(y_0 r_{50})^2 - 4mAr_{50}]^{\frac{1}{2}}}{2}$ Si $\frac{A}{L_0} < 0.2$, entonces $L_0 = (y_0 - 2m)r_{50}$	C
Relación entre la rigidez por carga puntual y carga distribuida.	$\left(\frac{S_0}{S} \right) = 1 - \bar{m} \left(\frac{A}{L_0} - 0.1 \right)$ Si $\frac{A}{L_0} < 0.2$, entonces $\left(\frac{S_0}{S} \right) = 1$	D

En donde:

E_{sg} = Módulo de elasticidad de la subrasante
 u_0 = Coeficiente de Poisson de la subrasante
 S_0 = Rigidez teórica por carga puntual
 S = Rigidez del pavimento = P/D_0 (carga distribuida)
 P = Carga aplicada
 D_0 = Deflexión máxima
 D_R = Deflexión a una distancia radial R
 R = Distancia radial desde el punto inicial de carga
 r_{50} = Distancia radial donde $\left(\frac{D_R}{D_0}\right) = 0.5$

L_0 = Longitud característica
 H = Espesor de la subrasante
 I = Factor de influencia
 A = Radio de huella circular
 α = Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla
 β = Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla
 B = Coeficiente de ajuste de curva, ver tabla
 γ_0 = Coeficiente para longitud característica,
 m = Coeficiente para la longitud característic
 \bar{m} = Coeficiente para relación de rigideces, v

En la ecuación A, tabla 21, puede verse que E_{sg} es inversamente proporcional a D_0 y a l_0 , es decir que E_{sg} es menor cuanto mayor es la deflexión y la longitud característica del pavimento para una relación de rigideces S_0/S dada, y viceversa. El primer caso corresponde a un pavimento que tiene una curva de deflexiones profunda y extensa y, en general, puede establecerse las relaciones cualitativas entre las características de la curva de deflexiones y el sistema, que se ilustran en la figura siguiente:

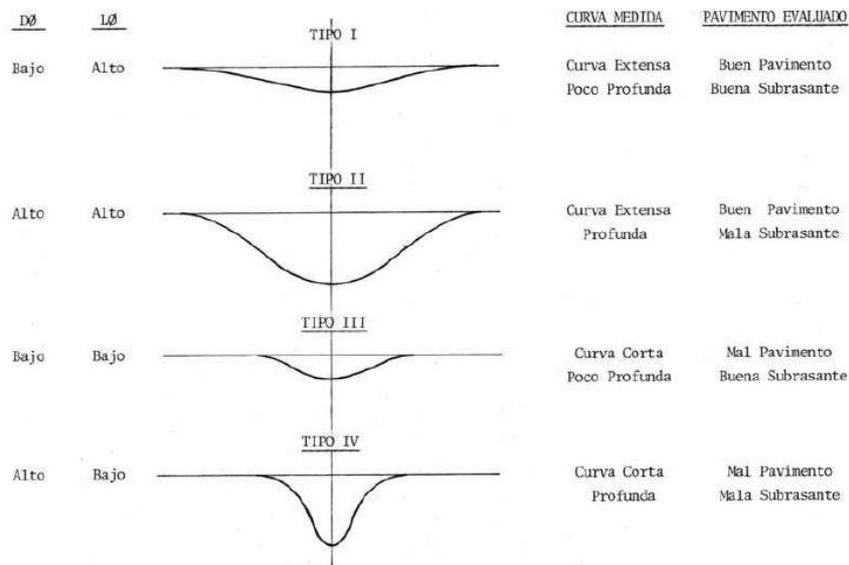


Figura 9. Significado cualitativo de tipos de curvas de deflexión (Hoffman, Del Aguila, 1985)

(R.N. Stubstad, Y.J. Jiang, M.L. Clevenson, and E.O., Febrero, 2006) en la publicación de la Federal Highway Administration de febrero 2006, describieron tres casos donde se obtiene los coeficientes de ajuste de curva, de longitud característica y para la relación de rigideces del modelo de Hogg, lo que permite solucionar las ecuaciones anteriores. Los casos I y II fueron trabajados para valores de H/l_0 igual a 10, aunque con diferentes módulos de Poisson y el caso III para cualquier valor del módulo de Poisson con un valor infinito de H/l_0 . A continuación, se presentan los tres casos trabajados por Wiseman et al. Ver tabla:

Tabla 22. Valor de coeficientes y variables de ajuste de curvas.

Ecuación	CASOS		I	II	III
	Profundidad del estrato rígido	h/L_0	10	10	Infinito
Coeficiente de Poisson	u_0	0.50	0.40	Todos	
A	Factor de influencia	I	0.1614	0.1689	0.1925
B	Valor de D_R/D_0		>0.70	>0.426	Todos
	$r_{50} = f\left(\frac{D_R}{D_0}\right)$	$1/\alpha$	2.460	2.629	3.115
		$1/\beta$	0.592	0.548	0.584
		B	0	0	0
	Valor de D_R/D_0		<0.70	<0.426	
	$r_{50} = f\left(\frac{D_R}{D_0}\right)$	$1/\alpha$	371.1	2283.4	
$1/\beta$		0.219	0.2004		
B		2	3		
C	$L_0 = f(r_{50}, \alpha)$	y_0	0.620	0.602	0.525
		m	0.183	0.192	0.180
D	$\frac{S_0}{S} = f\left(\frac{A}{L_0}\right)$	\bar{m}	0.52	0.48	0.44

Se observa que el desarrollo numérico para la obtención de los parámetros de evaluación es posible considerando $H/l_0=10$ y $H/l_0=$ Infinito, de la misma manera que para los nomogramas, se obtendrá l_0 , en base a valores cercanos a $D_R/D_0= 0.55$. **La particularidad de trabajar de manera numérica es que ayuda a predecir una distancia para la cual se cumple la relación $D_R/D_0= 0.55$.** De esta manera y al no obtener la longitud característica de manera gráfica, los resultados de los parámetros son más exactos.

Para fines de este trabajo, en los próximos cálculos a realizar se considerará el valor de $H/l_0=10$, el módulo de Poisson de la subrasante igual a 0.4 (CASO II), además se crearán celdas con el programa EXCEL para un rápido procesamiento de cálculo.

8.3 RELACIÓN ENTRE Esg y EL CBR.

Existe una relación establecida entre E_{sg} y el CBR de la subrasante debido a las numerosas comparaciones entre los valores de E_{sg} obtenidos por medio de la evaluación estructural usando viga Benkelman y los valores de CBR obtenidos in situ (Hoffman, Del Aguila, 1985).

$$E_{sg} = K (CBR); \quad (15)$$

, en donde E_{sg} viene dada en kg/cm² y el CBR en porcentaje. Se recomienda para K, valores de 100 a 160.

El valor de K varía de acuerdo al tipo de suelo, así se han determinado valores de $K = 100$ para suelos granulares gruesos; $K = 110$ para suelos granulares finos y $K = 130$ para suelos finos plásticos. De acuerdo a las numerosas experiencias, se recomienda utilizar un factor de CBR de 110 (Hoffman, Del Aguila, 1985).

Esta relación es comprobada con el estudio realizado por Heukelom y Klomp (1962) que consistía en la propagación de ondas senoidales desde la superficie, para determinar el módulo dinámico de los suelos. Cabe indicar que esta relación es aceptada y ampliamente difundida en el mundo de los pavimentos.

Un aspecto importante a considerar es que **las lecturas de campo con la Viga Bénkelman, representan recuperaciones elásticas del pavimento, no suponen deflexiones.** Para usar estos datos como entrada en el modelo de Hogg, deben restarse de la lectura última (que es a la

distancia $R=25$ cm en este caso, y que se considera que desde esta ya no existe recuperación), la lectura que le antecede. En este caso, la lectura D_o que interviene en el modelo es: $D_o - D_{25}$, que representa la deflexión del pavimento en la abscisa ensayada.

8.4 CÁLCULO DE MÓDULOS ELÁSTICOS DE LA SUBRASANTE (E_{sg})

El cálculo demanda seguir un proceso. A continuación, se muestra un ejemplo del proceso seguido para calcular el módulo de la subrasante para la abscisa 3+100:

ABSCISA	$D_{o,corr}$ (1/100 mm)	$D_{R,25,corr}$ (1/100 mm)	R (cm)	μ_o (Coef. Poisson)	H / l_o	A (cm)	D_r / D_o	Do / Dr	Intervalo elegido Dr/Do	Tabla 22		
										1/ α	1/ β	B
3+100,00	43,20	28,80	25	0,4	10	10,76	0,667	1,50	< 0,70	371,1	0,219	2

(continuación):

Ecuación B (Tabla 21)	Coeficientes y_o y m (tabla 22)		Ecuación C (tabla 21)	Nomograma	Verifico relación A/Lo	(Tabla 22)	(So / S) (Ec. D tabla 21)	Factor de influencia (tabla 22)	Esg			CBR(%) = Esg / 110
	f_{50} (cm)	y_o							m	Lo (cm)	lo (cm)	
36,29	0,602	0,192	17,59		0,61 A / Lo > 0,2	0,48	0,754386	0,1689	1.122,88	15.937,57	112,29	10,21

Prof. Estrato rígido H = 175,9 cm

La celda "Nomograma", fue creada para determinar la longitud característica mediante la gráfica 21, ya que cuando la relación D_R/D_o se aleja de 0,55, la solución numérica de las ecuaciones no es posible en la mayoría de los casos.

La longitud característica obtenida resultó 17,25 cm. De la relación $H / l_o = 10$, se sigue que $H=175,9$ cm (1,8 m). Este valor se registra como la profundidad del estrato rígido. Este valor, debe ser mayor a los espesores obtenidos de las calicatas practicadas. El valor de $l_o=17,25$ cm obtenido, indica pavimento débil, sobre una subrasante fuerte (CBR = 10,21 %).

Para la abscisa 10+700, se obtuvieron los siguientes resultados:

ABSCISA	$D_{o,corr}$ (1/100 mm)	$D_{R,25,corr}$ (1/100 mm)	R (cm)	μ_o (Coef. Poisson)	H / l_o	A (cm)	D_r / D_o	Do / Dr	Intervalo elegido Dr/Do	Tabla 22		
										1/ α	1/ β	B
10+700,00	92,96	85,82	25	0,4	10	10,76	0,923	1,08	> 0,70	2,46	0,592	0

(Continuación):

Ecuación B (Tabla 21)	Coeficientes y_o y m (tabla 22)		Ecuación C (tabla 21)	Nomograma	Verifico relación A/Lo	Verifico espesor con relación H/Lo=10	(Tabla 22)	(So / S) (Ec. D tabla 21)	Factor de influencia (tabla 22)	Esg			CBR(%) = Esg / 110
	f_{50} (cm)	y_o								m	Lo (cm)	lo (cm)	
108,95	0,602	0,192	61,96		0,17 A / Lo > 0,2	Si cumple	0,48	0,96464	0,1689	189,44	2.688,83	18,94	1,72

Prof. Estrato rígido H = 619,56 cm

La relación D_R/D_o permite calcular l_o de forma numérica. Aquí, $l_o = 61.56$ cm \rightarrow H = 619,56 cm (6,20 m). Este es un caso con l_o cercana a 80 cm, que indica pavimento fuerte sobre subrasante débil (CBR = 1,72%).

Los valores de CBR, tienen por objeto calificar la subrasante. La normativa peruana MTC 2014 propone la siguiente calificación:

Tabla 23. Calificación de la subrasante en función del CBR, según la MTC.

Categorías de la subrasante	CBR
S_0 = Subrasante Inadecuada	$CBR < 3\%$
S_1 = Subrasante Pobre	De $CBR \geq 3\%$ A $CBR < 6\%$
S_2 = Subrasante Regular	De $CBR \geq 6\%$ A $CBR < 10\%$
S_3 = Subrasante Buena	De $CBR \geq 10\%$ A $CBR < 20\%$
S_4 = Subrasante Muy Buena	De $CBR \geq 20\%$ A $CBR < 30\%$
S_5 = Subrasante Excelente	$CBR \geq 30\%$

Fuente: MTC, 2014.

Para los ejemplos citados, en el km 3+100 se tiene una subrasante buena, y para el km 10+700, subrasante inadecuada. La tabla 23 será empleada en el proceso de evaluar el estado de la subrasante.

8.5 CÁLCULO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD DE LA CAPA GRANULAR, ESPESOR DE MEJORAMIENTO Y NÚMERO ESTRUCTURAL EFECTIVO S_{neff} .

Cuando se obtiene una mala calificación de la subrasante, normalmente se recurre a reforzarla con un espesor granular, reconstruir o en tal caso a reforzar con un espesor asfáltico.

Hoffman en 1977 estableció en base a consideraciones de diseño y a la teoría de capas elásticas que, un pavimento flexible adecuadamente diseñado debe guardar la siguiente relación entre el módulo de elasticidad del pavimento E_p y el módulo de elasticidad de su subrasante E_{sg} :

$$\frac{E_p}{E_{sg}} = 3; \quad (16)$$

Con base en la teoría de placas-láminas y al concepto de rigidez flexional entre la placa del pavimento evaluado con módulo de elasticidad E^* de espesor H_c y el pavimento nuevo con módulo E_p y espesor H_{eq} (Hoffman, 1977), se tiene:

$$E^* H_c^3 = E_p H_{eq}^3; \quad (17)$$

E^* = Módulo de elasticidad del pavimento evaluado (en términos de material granular efectivo). Equivale al módulo de todas las capas de pavimento colocadas sobre la subrasante.

H_{eq} = Espesor de pavimento nuevo. Puede considerarse como espesor efectivo en términos de base granular del pavimento existente.

E_p = Módulo de elasticidad de pavimento nuevo.

H_c = Espesor total de las capas sobre la subrasante = espesor de carpeta más espesor material granular.

Combinando (16) y (17) se llega a:

$$\frac{H_{eq}}{H_c} = \left(\frac{E^*}{3E_{sg}} \right)^{1/3}; \quad (18)$$

Si $H_{eq} / H_c \geq 1 \rightarrow$ el pavimento es utilizable. Para otros casos, deberá ser reforzado. A su vez, el cumplimiento de (18), implica que $E^* / E_{sg} > 3$.

La expresión anterior (ecuación 18) permite estimar si el espesor H_c del pavimento con modulo E^* es totalmente utilizable o si es necesario reforzarlo.

8.6 ESPESOR DE REFUERZO.

Conocido el valor del espesor del pavimento nuevo H_{eq} , es posible calcular el espesor de refuerzo necesario, restando de este valor, el espesor de las capas existentes H_c :

$$\text{Espesor de refuerzo} = H_{eq} - H_{\text{capas gran existentes.}}$$

Del informe de espesores de capas medidos en las calicatas, se reportaron espesores de las capas de pavimento existente, que se resumen en la tabla siguiente:

Tabla 24. Reporte de espesores de capas existentes.

REPORTE DE ESPESORES (cm) DE CAPAS DE PAVIMENTO EXSITENTE						
CALICATA km:	CALZADA	Carpeta asf	Mat. Granular 1	Mat. Granular 2	Mat. Granular 3	Espesor total (cm)
7+900	Izquierda	14	52			66
8+100	Izquierda	16	51			67
8+500	Izquierda	24	15			39
8+700	Izquierda	20	12			32
9+700	Izquierda	25	28			53
10+700	Izquierda	10	5	67	10	92
12+800	Derecha	23	39			62
13+000	Derecha	24	61			85
14+000	Derecha	26	40			66
15+600	Derecha	19	36			55
19+700	Derecha	18	48			66
21+200	Derecha	26	33			59
PROMEDIO (cm)=						61,83
Promedio sin carpeta (cm)						41,42

De esta información, el espesor promedio de capas granulares es **41,42 cm**.

Ullidtz (Wiseman et al, 1997) por medio de la variable “espesor equivalente- H_E ”, relacionó matemáticamente la deflexión máxima D_0 , el módulo de elasticidad de la subrasante E_{sg} y el módulo de elasticidad equivalente del pavimento E^* , en las siguientes expresiones:

$$H_E = (0.9)(H_C) \left(\frac{E^*}{E_{sg}} \right)^{\frac{1}{3}} \dots$$

$$D_0 = A(B + C) \dots$$

Siendo,

D_0 = Deflexión máxima

$$A = \frac{(1 + u_0)P}{2\pi} \dots$$

$$B = \frac{1}{E^*} \left[\frac{2(1 - u_0)}{r} - \frac{1}{R_1} \left(2(1 - u_0) + \left(\frac{Z_1}{R_1} \right)^2 \right) \right] \dots$$

$$C = \frac{1}{E_{sg}} \left[\frac{1}{R_2} \left(2(1 - u_0) + \left(\frac{Z_2}{R_2} \right)^2 \right) - \frac{1}{R_3} \left(2(1 - u_0) + \left(\frac{Z_3}{R_3} \right)^2 \right) \right] \dots$$

$$r = 1.5 \cdot A$$

$$Z_1 = H_C + 0.6 \cdot \frac{A^2}{H_C}$$

$$R_1 = \sqrt{Z_1^2 + (1.5A)^2}$$

$$Z_2 = H_E + 0.6 \cdot \frac{A^2}{H_E}$$

$$R_2 = \sqrt{Z_2^2 + (1.5A)^2}$$

$$Z_3 = (H_E + N \cdot L_0) + 0.6 \cdot \frac{A^2}{H_E + N \cdot L_0}$$

$$R_3 = \sqrt{Z_3^2 + (1.5A)^2}$$

$$N = 10 \text{ para base rocosa de } \frac{H}{L_0} = 10$$

$$N = 100 \text{ para base rocosa de } \frac{H}{L_0} = \text{Infinito}$$

A = Radio de huella

P = Carga total en la llanta

De esta manera es posible obtener el módulo de elasticidad del pavimento evaluado E^* y conocer si el pavimento realmente necesita un refuerzo estructural en términos de estructura granular utilizando la ecuación 17.

En cada abscisa ensayada, se calculó, a partir de la longitud característica, el número estructural efectivo del pavimento, mediante una ecuación que deriva de la proporcionada por la (AASHTO, 1993):

$$SN_{eff} = 0.0182 \cdot lo^3 \cdot \sqrt[3]{Esg}; \quad (19)$$

, con Esg en MPa, y lo en cm.

El número estructural requerido se calculó mediante la ecuación propuesta por la (AASHTO, 1993):

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_0 + 9,36 \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{10,94}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} M_R - 8,07 \quad (20)$$

La relación S_{Neff} / S_{Nreq} , se emplea para determinar si existe o no carencia estructural:

$$\frac{S_{Neff}}{S_{Nreq}} \geq 1, \text{ No existe carencia estructural}$$

$$\frac{S_{Neff}}{S_{Nreq}} < 1, \text{ Existe carencia estructural}$$

A manera de ejemplo, se muestra el proceso de cálculo de los módulos de elasticidad de las capas granulares, para la abscisa 3+100, con el S_{Neff} respectivo:

PROCESO PARA CALCULAR E^* : Módulo del pavimento evaluado km: 3+100

D_o (cm)	ν_o (Coef. Poisson)	P (kg)	A	H_c (cm)	E _{sg} (kg/cm ²)	A (cm)	r (cm)	z1	R1	E^* (iteraciones) (kg/cm ²)	B
0,04	0,4	4100,0	913,55	61,83	1122,88	10,76	16,14	62,96	64,99	1800	0,000023
										25548,336	psi

$$E^* H_c^3 = E_p H_{eq}^3$$

$$E_p = E^* (H_c / H_{eq})^3 = \frac{3368,63}{47.812,72} \text{ kg/cm}^2 \text{ psi}$$

$$E^* / E_{sg} = 1,60$$

$$H_{eq} / H_c = 0,81 < 1: \text{ requiere refuerzo}$$

(continuación)

HE (cm)	Z2	R2	l_o (cm)	Z3	R3	C	$D_o = A(B + C)$
65,13	66,20	68,14	17,59	241,318	241,857	1,99375E-05	0,04

Heq =	50,18 cm
Esp. De refuerzo =	8,76 cm

(continuación)

$$S_{Neff} = 0.0182 L_0^3 \sqrt{E_{sg}} \dots \quad L_0: \text{ Longitud característica en centímetros (cm).} \quad E_{sg}: \text{ Módulo de elasticidad de la subrasante en mega pascales (Mpa).} \quad S_{Neff} = 1,544$$

El espesor de refuerzo se calculó mediante la resta $50,18 - 41,42 = 8,76$ cm. Equivale al espesor de material granular faltante para lograr obtener la estructura con módulo E_p , de 47 812,72 psi calculada.

En el anexo 6 se presentan los módulos calculados para cada abscisa. Es necesario señalar, que no en todas las abscisas fue posible calcular el módulo usando el modelo de Hogg, por la limitación que impone la relación D_R / D_o , pero la cantidad de datos obtenidos fue suficiente para evaluar estructuralmente el pavimento.

El desarrollo numérico para la obtención de los parámetros de evaluación es posible considerando $H / l_0 = 10$ y $H / l_0 = \text{Infinito}$, de la misma manera que para los nomogramas, se obtendrá l_0 , en base a valores cercanos a $D_0 / D_r = 0.55$.

8.7 RESULTADOS DEL MODELO DE HOGG.

En el Anexo 9 se detallan los cálculos realizados de módulos elásticos, tanto para la subrasante E_{sg} como de las capas de pavimento superiores E^* , valores de CBR de subrasante, longitud característica l_0 y espesor de refuerzo requerido para la capa granular $H_{eq} - H_c$. Estos resultados, permitieron calificar cualitativamente el cuenco de deflexión, y calificar el estado de la subrasante mediante el valor de soporte CBR.

Para la calificación cualitativa del cuenco de deformación, referirse a la figura 9.

Tabla 25. Resumen de resultados del modelo de Hogg.

RESUMEN DE RESULTADOS DEL MODELO DE HOGG Y DESCRIPCIÓN CUALITATIVA DEL CUENCO DE DEFLEXIÓN.

E_{sg} = Módulo de elasticidad de la subrasante

E^* = Módulo de elasticidad del pavimento (capa granular)

H_c = Espesor de capa granular existente = 41,42 cm (promedio) (Informe de espesores, Anexo 5).

CBR = $E_{sg} / 110$; con E_{sg} en kg/cm^2 (afectar E_{sg} en psi , por factor 0,0705)

Necesidad de refuerzo: si $E^* / E_{sg} < 3$

l_0 : Longitud característica

D_0 : Deflexión máxima.

SUBTRAMO	ABSCISA	CALZADA	Esg (psi)	E* (psi)	CBR (%)	E* / Esg	Necesidad de refuerzo	Longitud característica a l_0 (cm)	D_0 ($\times 10^{-2}$ mm)	CUENCO DE DEFORMACIÓN (descripción cualitativa)
1	2+500	L1 Izquierda	30.308,39	53.935,38	19,41	1,78	Requiere refuerzo	22,00	33,58	Curva corta poco profunda Pavim. Eval: Mal pavimento Buena subrasante
	2+600	L2 Derecha	28.424,23	49.677,32	18,21	1,75	Requiere refuerzo	21,82	36,00	
	2+700	L1 Izquierda	30.436,23	49.677,32	19,49	1,63	Requiere refuerzo	21,87	33,58	
	3+100	L1 Izquierda	17.082,75	25.548,34	10,94	1,50	Requiere refuerzo	17,60	67,16	
	4+300	L1 Izquierda	20.189,08	38.322,50	12,93	1,90	Requiere refuerzo	24,88	47,01	
	4+400	L2 Derecha	12.908,43	38.322,50	8,27	2,97	Requiere refuerzo	30,32	64,80	
	4+500	L1 Izquierda	13.827,68	35.483,80	8,86	2,57	Requiere refuerzo	30,35	60,45	
	4+700	L1 Izquierda	12.698,91	21.574,15	8,13	1,70	Requiere refuerzo	21,81	80,60	
2	4+900	L1 Izquierda	6.991,86	30.516,07	4,48	4,36	Pavimento utilizable	43,91	91,22	Curva corta Profunda Mal pavimento Mala subrasante Existen deflexiones mayores a 1 mm, con l_0 entre 13,22 a 27,68 cm. La subrasante ya no experimenta recuperación elástica.
	5+200	L2 Derecha	4.867,20	29.806,39	3,12	6,12	Pavimento utilizable	47,85	122,40	
	5+300	L1 Izquierda	12.580,00	14.903,20	8,06	1,18	Requiere refuerzo	17,59	91,22	
	5+500	L1 Izquierda	15.293,47	35.057,99	9,80	2,29	Requiere refuerzo	30,29	54,73	
	5+700	L1 Izquierda	10.939,19	10.219,33	7,01	0,93	Requiere refuerzo	13,22	115,54	
	5+900	L1 Izquierda	18.881,38	23.525,76	12,09	1,25	Requiere refuerzo	17,57	60,81	
	6+000	L2 Derecha	15.937,57	22.709,63	10,21	1,42	Requiere refuerzo	17,59	72,00	
	6+300	L1 Izquierda	19.365,51	48.683,77	12,40	2,51	Requiere refuerzo	31,00	42,57	
	6+500	L1 Izquierda	17.660,54	14.477,39	11,31	0,82	Requiere refuerzo	9,00	66,89	
	6+900	L1 Izquierda	11.670,24	21.716,09	7,47	1,86	Requiere refuerzo	24,63	81,82	
	7+700	L1 Izquierda	7.696,42	13.767,71	4,93	1,79	Requiere refuerzo	22,86	129,55	
	7+900	L1 Izquierda	8.414,98	11.298,04	5,39	1,34	Requiere refuerzo	17,59	136,36	
	8+300	L1 Izquierda	8.140,29	18.877,38	5,21	2,32	Requiere refuerzo	27,69	109,09	
	8+700	L1 Izquierda	5.787,68	12.774,17	3,71	2,21	Requiere refuerzo	26,75	156,82	
	9+200	L2 Derecha	16.957,89	22.141,89	10,86	1,31	Requiere refuerzo	17,59	67,67	
	9+300	L1 Izquierda	19.231,74	16.180,61	12,32	0,84	Requiere refuerzo	10,00	63,38	
10+100	L1 Izquierda	14.745,89	16.180,61	9,44	1,10	Requiere refuerzo	15,22	82,39		
10+300	L1 Izquierda	12.293,75	12.490,30	7,87	1,02	Requiere refuerzo	13,98	101,41		
10+500	L1 Izquierda	8.756,62	19.019,32	5,61	2,17	Requiere refuerzo	27,69	101,41		
10+700	L1 Izquierda	3.034,34	26.258,01	1,94	8,65	Pavimento utilizable	61,94	158,45		
3	11+300	L1 Izquierda	10.044,16	32.645,10	6,43	3,25	Pavimento utilizable	35,21	75,00	Curva corta, poco profunda. Mal pavimento Buena subrasante
	12+100	L1 Izquierda	16.835,55	22.709,63	10,78	1,35	Requiere refuerzo	17,58	68,18	
	12+700	L1 Izquierda	15.957,47	22.709,63	10,22	1,42	Requiere refuerzo	19,66	68,18	
	13+100	L1 Izquierda	30.676,94	25.122,53	19,65	0,82	Requiere refuerzo	16,75	45,57	
	13+300	L1 Izquierda	20.221,72	18.025,77	12,95	0,89	Requiere refuerzo	13,07	62,66	
	14+300	L1 Izquierda	12.024,58	34.632,19	7,70	2,88	Requiere refuerzo	35,21	62,66	
4	14+500	L1 Izquierda	24.033,96	39.741,86	15,39	1,65	Requiere refuerzo	24,56	39,87	Los casos para los que $15 < l_0 < 18\text{cm}$, se dan con $D_0 < 1\text{mm}$. Representan curvas cortas y poco profundas (mal pavimento, buena subrasante)
	14+900	L1 Izquierda	12.024,58	34.064,45	7,70	2,83	Requiere refuerzo	35,21	62,66	
	15+000	L2 Derecha	15.940,14	22.425,76	10,21	1,41	Requiere refuerzo	17,59	72,00	
	15+100	L1 Izquierda	8.827,42	224.257,62	5,65	25,40	Pavimento utilizable	100,00	36,24	
	15+300	L1 Izquierda	23.546,14	19.161,25	15,08	0,81	Requiere refuerzo	17,59	60,40	
	15+400	L2 Derecha	31.880,28	43.999,91	20,42	1,38	Requiere refuerzo	17,59	36,00	
	15+500	L1 Izquierda	8.827,42	227.096,32	5,65	25,73	Pavimento utilizable	100,00	36,24	
	15+600	L2 Derecha	7.362,33	31.225,74	4,72	4,24	Pavimento utilizable	39,71	93,60	
	15+700	L1 Izquierda	25.801,84	24.980,60	16,53	0,97	Requiere refuerzo	13,98	48,32	
	16+100	L1 Izquierda	11.336,64	34.064,45	7,26	3,00	Pavimento utilizable	35,22	66,44	
	16+300	L1 Izquierda	18.998,43	22.709,63	12,17	1,20	Requiere refuerzo	17,59	60,40	
	16+700	L1 Izquierda	18.848,92	42.438,62	12,07	2,25	Requiere refuerzo	32,53	42,28	
	17+400	L2 Derecha	4.896,01	127.741,68	3,14	26,09	Pavimento utilizable	100,00	66,67	
	17+500	L1 Izquierda	24.419,70	25.974,14	15,64	1,06	Requiere refuerzo	16,47	48,32	
	17+900	L1 Izquierda	5.296,45	126.322,33	3,39	23,85	Pavimento utilizable	100,00	60,40	
	18+000	L2 Derecha	17.212,21	22.468,34	11,02	1,31	Requiere refuerzo	17,59	66,67	
	18+100	L1 Izquierda	8.827,42	212.902,80	5,65	24,12	Pavimento utilizable	100,00	36,24	
	18+300	L1 Izquierda	5.296,45	127.741,68	3,39	24,12	Pavimento utilizable	100,00	60,40	
18+500	L1 Izquierda	6.620,56	163.225,48	4,24	24,65	Pavimento utilizable	100,00	48,32		
18+600	L2 Derecha	5.999,73	161.806,13	3,84	26,97	Pavimento utilizable	100,00	53,33		
18+900	L1 Izquierda	8.827,42	212.902,80	5,65	24,12	Pavimento utilizable	100,00	36,24		
Los casos para los que $l_0 = 100\text{cm}$, y $D_0 > 1\text{mm}$, representan cuenco extenso y profundo (buen pavimento).										

	19+300	L1	Izquierda	5.296,45	127.741,68	3,39	24,12	Pavimento utilizable	100,00	60,40	mala subrasante)
	19+400	L2	Derecha	2.665,88	70.967,60	1,71	26,62	Pavimento utilizable	100,00	120,00	
	19+500	L1	Izquierda	19.001,49	22.709,63	12,17	1,20	Requiere refuerzo	17,59	60,40	
	19+700	L1	Izquierda	2.647,79	63.870,84	1,70	24,12	Pavimento utilizable	100,00	120,81	
	19+900	L1	Izquierda	5.296,45	127.741,68	3,39	24,12	Pavimento utilizable	100,00	60,40	
5	20+300	L1	Izquierda	18.848,92	42.438,62	12,07	2,25	Requiere refuerzo	32,53	46,56	Cruvas cortas, poco profundas Mal pavimento, buena subrasante
	21+500	L1	Izquierda	18.708,09	17.741,90	11,98	0,95	Requiere refuerzo	14,14	82,88	
	21+700	L1	Izquierda	9.278,00	198.709,28	5,94	21,42	Pavimento utilizable	100,00	34,48	
	21+900	L1	Izquierda	8.827,42	212.902,80	5,65	24,12	Pavimento utilizable	100,00	36,24	

Como se expone en la tabla 25, en el subtramo 4 se presentan cuencos de deflexión diversos, con buena y mala subrasante.

Los valores de CBR obtenidos presentan una variación con discontinuidades bruscas, como se ve en la gráfica:

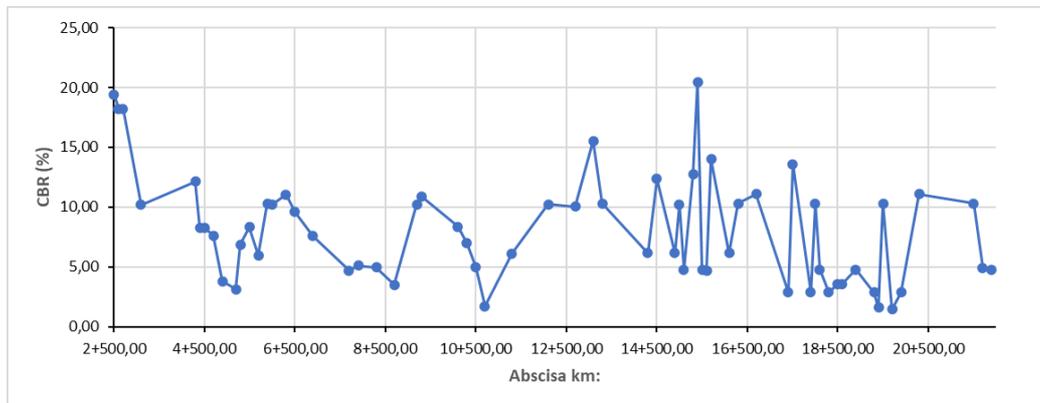


Gráfico 23.

Nuevamente, se debe hacer referencia *al concepto de homogeneidad*. Para un correcto análisis de elección del CBR, se debe recurrir a la tramificación efectuada para analizar las deflexiones del pavimento.

Con la tramificación, se obtuvieron gráficas de CBR más uniformes, sin discontinuidades bruscas. Se adoptó, para elegir el CBR de diseño, el percentil 87,5%, pues se tienen para todos los tramos, ESAL mayores a 10^6 , siguiendo la recomendación del Instituto del Asfalto (Montejo, 2002)

Tabla 26. Elección de resistencia (CBR) en función del número de ejes equivalentes.

LIMITES PARA SELECCIÓN DE RESISTENCIA	
Numero de ejes de 8.2 toneladas en el carril de diseño (N)	Percentil a seleccionar para hallar la resistencia
$<10^4$	60
$10^4 - 10^5$	75
$>10^6$	87.5

Fuente: MS-1, Asphalt Institute, Thickness Dassing, 1981.

8.7.1 Cálculo del CBR de diseño y módulo de la subrasante por subtramos.

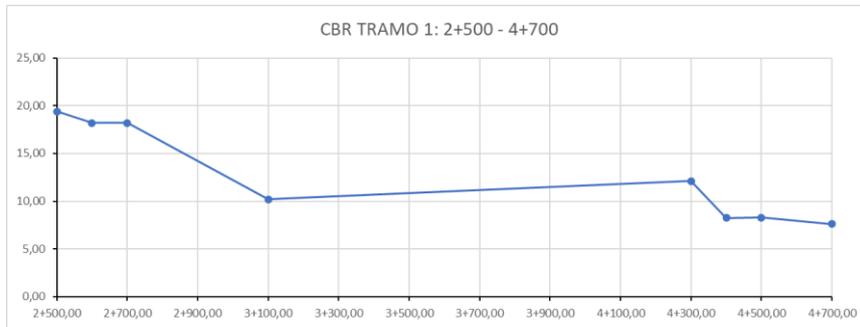


Gráfico 24 a.

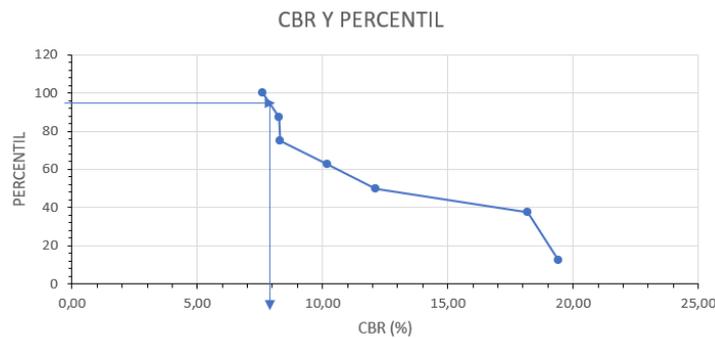


Gráfico 24 b.

No. Datos	CBR (%)	No. Valores mayores o iguales	% valores mayores o iguales	ESALs	Percentil de diseño	CBR (%)_diseño	CALIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE
8	7,62	8	100	8.830.738,83	87,5	7,8	Regular
	8,27	7	87,5				Regular
	8,29	6	75				Regular
	10,21	5	62,5				Buena
	12,12	4	50				Buena
	18,21	3	37,5				Buena
	19,41	1	12,5				Buena

CBR PROMEDIO = 12,02
 DESVIACIÓN ESTÁNDAR = 4,89
 PERCENTIL (%) = 87,5
 CBR (%)_diseño = 7,8
 CALIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE Regular Buena
 42,86 %
 57,14 %

Probabilidad del 80% de presentar CBR = 12,02 ± 4,89

Esg =	858	kg/cm ²
	12.178,04	psi
	85,8	Mpa

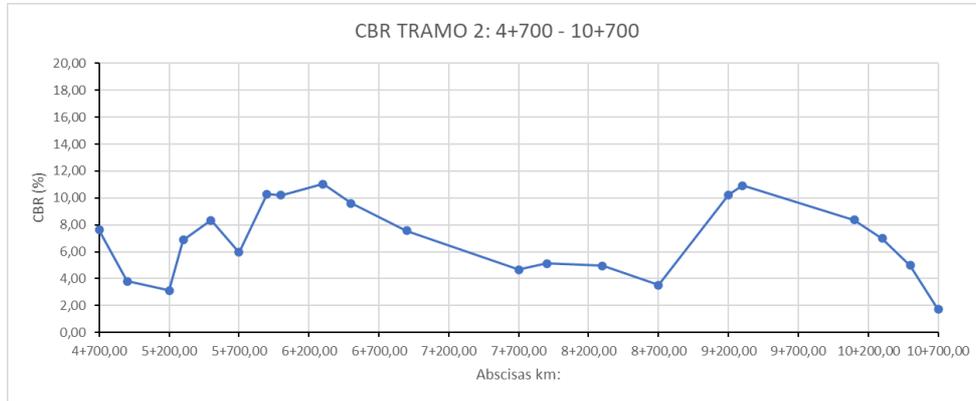


Gráfico 25 a.

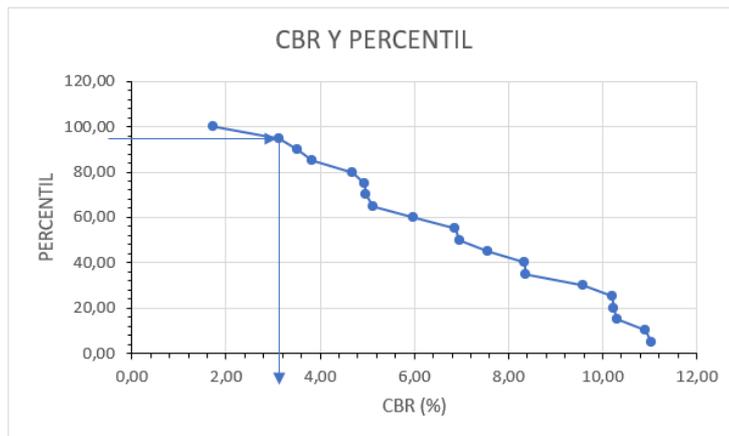


Gráfico 25 b.



No. Datos	CBR	No. Valores mayores o iguales	% valores mayores o iguales	ESALs	Percentil de diseño	CBR (%)_diseño	CALIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE
20	1,72	20	100,00	> 10 ⁶	87,5	3,2	Inadecuada
	3,12	19	95,00				Pobre
	3,52	18	90,00				Pobre
	3,82	17	85,00				Pobre
	4,68	16	80,00				Pobre
	4,95	15	75,00				Pobre
	4,97	14	70,00				Pobre
	5,12	13	65,00				Pobre
	5,97	12	60,00				Pobre
	6,87	11	55,00				Regular
	6,98	10	50,00				Regular
	7,56	9	45,00				Regular
	8,34	8	40,00				Regular
	8,37	7	35,00				Regular
	9,59	6	30,00				Regular
	10,21	5	25,00				Buena
	10,24	4	20,00				Buena
	10,30	3	15,00				Buena
	10,92	2	10,00				Buena
	11,04	1	5,00				Buena

CBR PROMEDIO = 6,91
 DESVIACIÓN ESTÁNDAR 2,88
 PERCENTIL (%) 0
 CBR (%) = 0
 CALIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE Pobre 40 %
 Regular 30 %
 Buena 25 %
 Probabilidad del 80% de presentar CBR = 6,91 ± 2,88

Esg =

352	kg/cm2
4.996,12	psi
35,2	Mpa

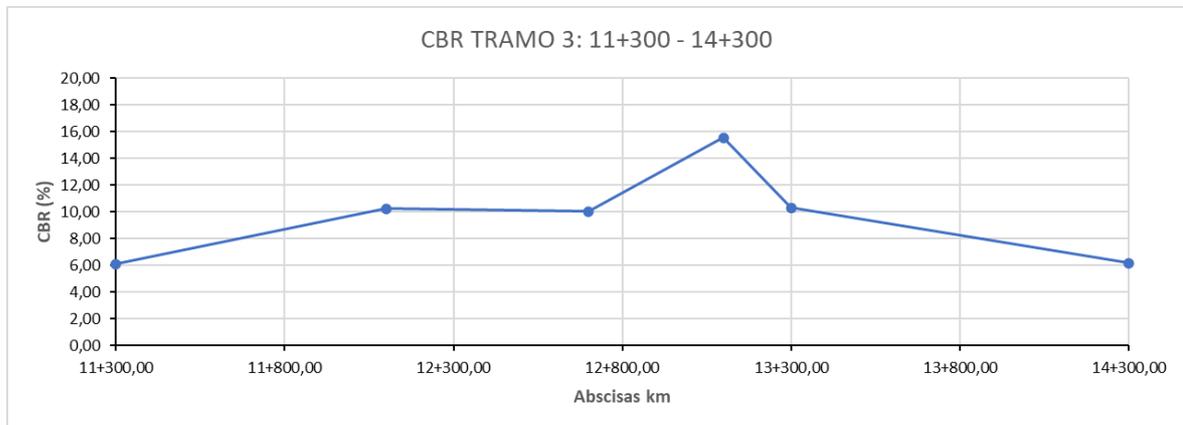


Gráfico 26 a.

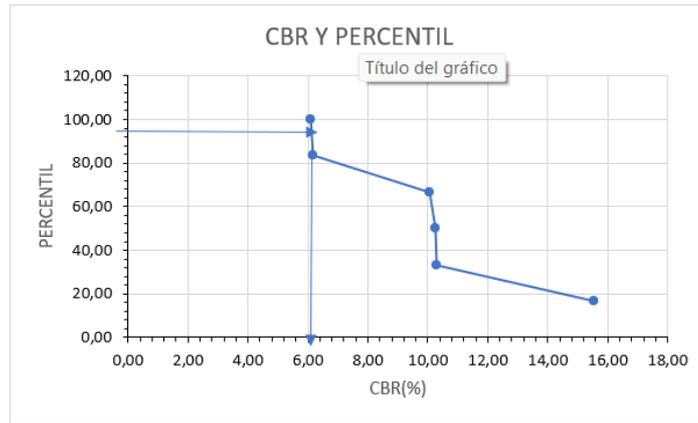


Gráfico 26 b.

No. Datos	CBR	No. Valores mayores o iguales	% valores mayores o iguales	ESALs	Percentil de diseño	CBR (%)_diseño	CALIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE
6	6,11	6	100,00	> 10 ⁶	87,5	6,2	Regular
	6,17	5	83,33				Regular
	10,06	4	66,67				Buena
	10,24	3	50,00				Buena
	10,31	2	33,33				Buena
	15,54	1	16,67				Buena

CBR PROMEDIO = 9,74
 DESVIACIÓN ESTÁNDAR = 3,47
 PERCENTIL (%) = 87,5
 CBR (%)_diseño = 6,2

CALIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE Buena 66,67 %
 Regular 33,33 %

Probabilidad del 80% de presentar CBR = 9,74 ± 3,47

Esg =

682	kg/cm ²
9.679,98	psi
68,2	Mpa

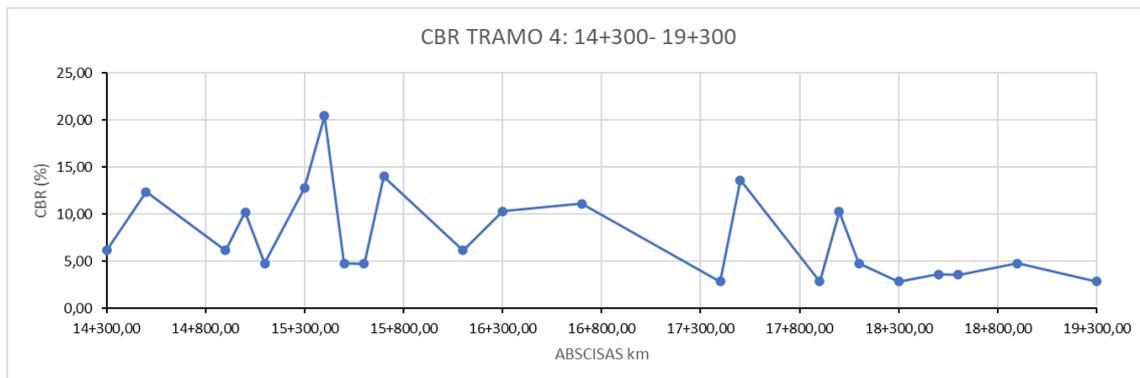


Gráfico 27 a.

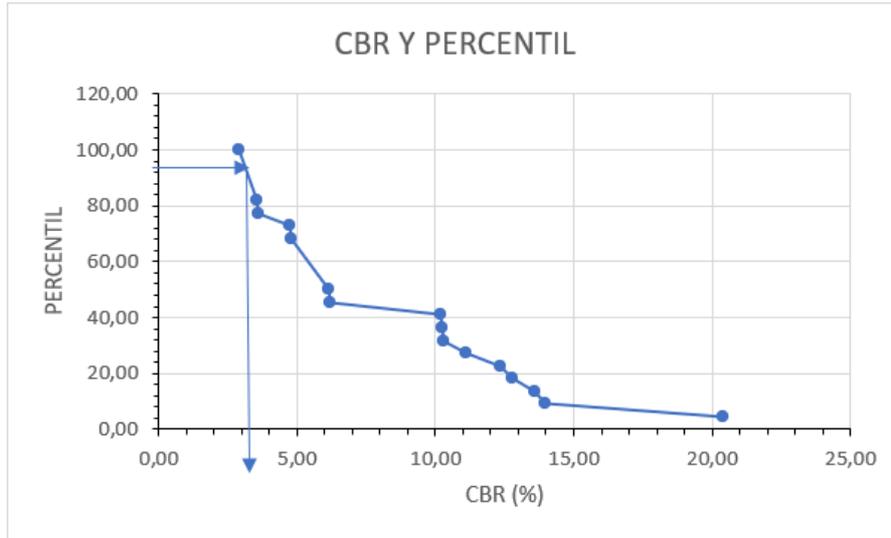


Gráfico 27 b.

No. Datos	CBR	No. Valores mayores o iguales	% valores mayores o iguales	ESALs	Percentil de diseño	CBR (%_diseño)	CALIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE
22	2,87	22	100,00	> 10 ⁶	87,5	3,2	Inadecuada
	3,57	18	81,82				Pobre
	3,59	17	77,27				Pobre
	4,72	16	72,73				Pobre
	4,79	15	68,18				Pobre
	6,15	11	50,00				Regular
	6,17	10	45,45				Regular
	10,21	9	40,91				Buena
	10,25	8	36,36				Buena
	10,31	7	31,82				Buena
	11,10	6	27,27				Buena
	12,34	5	22,73				Buena
	12,77	4	18,18				Buena
	13,60	3	13,64				Buena
	14,00	2	9,09				Buena
	20,42	1	4,55				Muy Buena

CBR PROMEDIO = 9,18
 DESVIACIÓN ESTÁNDAR = 4,89
 PERCENTIL (%) = 87,5
 CBR (%_diseño) = 3,20
 CALIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE

Pobre	25,00 %
Regular	12,50 %
Buena	50,00 %
Inadecuada	6,25 %
Muy Buena	6,25 %

Probabilidad del 80% de presentar CBR = 9,18 ± 4,89

Esg =

352	kg/cm2
4.996,12	psi
35,2	Mpa

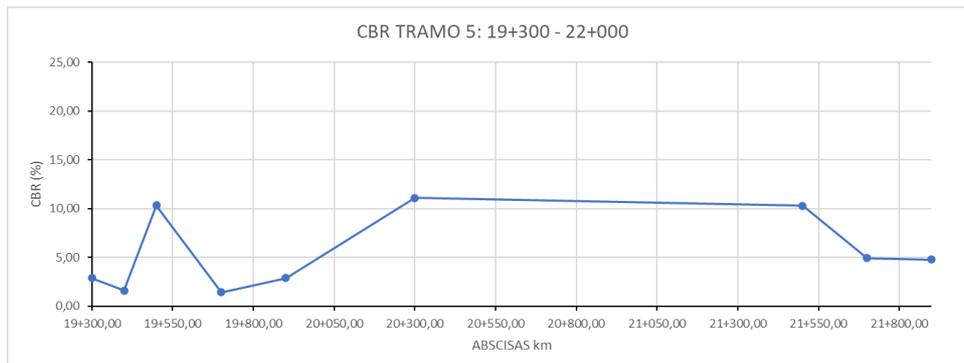


Gráfico 28 a.

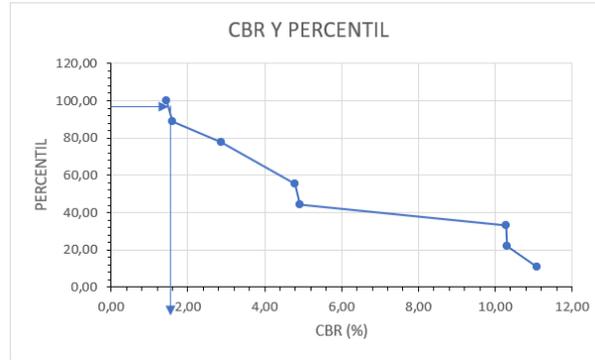


Gráfico 28 b.

No. Datos	CBR	No. Valores mayores o iguales	% valores mayores o iguales	ESALs	Percentil de diseño	CBR (%)_diseño	CALIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE
9	1,44	9	100,00	> 10 ⁶	87,5	1,6	Inadecuada
	1,59	8	88,89				Inadecuada
	2,87	7	77,78				Inadecuada
	4,79	5	55,56				Pobre
	4,93	4	44,44				Pobre
	10,30	3	33,33				Buena
	10,31	2	22,22				Buena
	11,10	1	11,11				Buena

CBR PROMEDIO = 5,91
 DESVIACIÓN ESTÁNDAR = 4,06
 PERCENTIL (%) = 87,5
 CBR (%)_diseño = 1,60
 CALIFICACIÓN DE LA SUBRASANTE:

Pobre	25,00 %
Regular	0,00
Buena	37,50 %
Inadecuada	37,50 %

Probabilidad del 80% de presentar CBR = 5,91 ± 4,06

Esg =

176	kg/cm ²
2.498,06	psi
17,60	Mpa

Tabla 27. Resumen de CBR y módulo de elasticidad de la subrasante por subtramos

SUBTRAMO	CBR (%) diseño	Módulo de elast. Subr. E_{sg} (MPa)
2+500 – 4+700	7,8	85,8
4+700 – 10+700	3,2	35,2
11+300 – 14+300	6,2	68,2
14+300 – 19+300	3,2	35,2
19+300 – 22+000	1,6	17,6

8.8 CÁLCULO DEL NÚMERO ESTRUCTURAL REQUERIDO SN_{REQ} (AÑO 2024).

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS:

- W_{18} = Número de cargas de eje simple equivalentes de 18 kips (80 kN), o ESAL (Equivalent Single Axle Load)
- Z_R = Valor Z (área bajo la curva de distribución) correspondiente a la curva estandarizada, para un nivel de confiabilidad R
Para autopistas, la AASHTO [4] recomienda $R = 85$, para la cual $Z_R = -1,037$
- S_o = Desviación estándar de todas las variables. Error estándar combinado de la predicción del tránsito y del comportamiento del pavimento
Esta debe tomarse de 0,40 a 0,50 para pavimentos flexibles y 0,30 a 0,40 para pavimentos rígidos (AASHTO, 1993; pág. I-62)
 $S_o = 0,5$
- SN = Número estructural total del pavimento (a calcular).
- ΔPSI = Pérdida de serviciabilidad prevista en el diseño.
Serviciabilidad inicial $P_o = 4,2$
Serviciabilidad final $P_t = 2$ (85% de usuarios declaran la vía inaceptable, AASHTO, 1993 [4])
 $\Delta PSI = 2,2$
- M_R = Módulo resiliente de la subrasante (psi)
 $M_R = 4326 * LnCBR + 241$, para suelos con $CBR > 20\%$
 $M_R = 3000 * CBR^{0,65}$, para suelos con CBR entre 7.2% y 20%
 $M_R = 1500 * CBR$, para suelos con $CBR < 7.2\%$
 $M_R = 2555 * CBR^{0,64}$, esta ecuación es recomendada por el MEPDG (Mechanistic Empirical Pavement Design Guide).

Ecuación fundamental:

$$\log_{10}(W_{18}) = Z_R S_o + 9,36 \log_{10}(SN + 1) - 0,20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4,2 - 1,5} \right]}{0,40 + \frac{10,94}{(SN + 1)^{5,19}}} + 2,32 \log_{10} M_R - 8,07 \quad (20)$$

En la ecuación fundamental, M_R , es el módulo de la subrasante, calculado con las ecuaciones descritas en la definición de términos, que dependen del CBR de la subrasante.

Los resultados se muestran en la tabla siguiente:

Tabla 28. Número estructural requerido (ESAL año 2024).

Abscisa	CBR (%)	$W_{18} \cdot 2024$	Z_R	S_o	ΔPSI	M_R (psi)	SN_{req}	Miembro izq. Ec. 20 (log W_{18})	Miembro der. Ec. 20	Diferencia
2+500,00	19,41	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	20624	2,25	5,859	5,855	0,00
2+600,00	18,21	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	19781	2,29	5,859	5,861	0,00
2+700,00	19,49	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	20681	2,25	5,859	5,857	0,00
3+100,00	10,94	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	14208	2,57	5,859	5,856	0,00
4+300,00	12,93	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	15837	2,48	5,859	5,862	0,00
4+400,00	8,27	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	11842	2,74	5,859	5,860	0,00
4+500,00	8,86	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	12384	2,70	5,859	5,861	0,00
4+700,00	8,13	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	11717	2,75	5,859	5,860	0,00
4+900,00	4,48	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	6717	3,31	5,859	5,862	0,00
5+200,00	3,12	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	4676	3,71	5,859	5,857	0,00
5+300,00	8,06	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	11645	2,76	5,859	5,864	-0,01
5+500,00	9,80	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	13222	2,64	5,859	5,861	0,00
5+700,00	7,01	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	10510	2,85	5,859	5,856	0,00
5+900,00	12,09	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	15163	2,52	5,859	5,859	0,00
6+000,00	10,21	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	13581	2,61	5,859	5,855	0,00
6+300,00	12,40	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	15414	2,50	5,859	5,858	0,00
6+500,00	11,31	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	14518	2,55	5,859	5,855	0,00
6+900,00	7,47	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	11091	2,80	5,859	5,858	0,00

6+900,00	7,47	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	11091	2,80	5,859	5,858	0,00
7+700,00	4,93	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	7394	3,21	5,859	5,864	0,00
7+900,00	5,39	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	8085	3,11	5,859	5,856	0,00
8+300,00	5,21	723.233,15	-1,037	0,45	2,20	7821	3,15	5,859	5,862	0,00
8+700,00	3,71	1.127.120,98	-1,037	0,45	2,20	5560	3,74	6,052	6,057	0,00
9+200,00	10,86	1.127.120,98	-1,037	0,45	2,20	14140	2,75	6,052	6,049	0,00
9+300,00	12,32	1.127.120,98	-1,037	0,45	2,20	15345	2,68	6,052	6,056	0,00
10+100,00	9,44	1.127.120,98	-1,037	0,45	2,20	12912	2,84	6,052	6,053	0,00
10+300,00	7,87	1.127.120,98	-1,037	0,45	2,20	11472	2,95	6,052	6,048	0,00
10+500,00	5,61	1.127.120,98	-1,037	0,45	2,20	8413	3,27	6,052	6,051	0,00
10+700,00	1,94	1.127.120,98	-1,037	0,45	2,20	2915	4,56	6,052	6,054	0,00
11+300,00	6,43	1.127.120,98	-1,037	0,45	2,20	9650	3,13	6,052	6,054	0,00
12+100,00	10,78	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	14074	2,84	6,136	6,140	0,00
12+700,00	10,22	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	13592	2,87	6,136	6,136	0,00
13+100,00	19,65	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	20787	2,48	6,136	6,136	0,00
13+300,00	12,95	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	15854	2,72	6,136	6,132	0,00
14+300,00	7,70	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	11308	3,05	6,136	6,135	0,00
14+500,00	15,39	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	17738	2,62	6,136	6,135	0,00
14+900,00	7,70	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	11308	3,05	6,136	6,135	0,00
15+000,00	10,21	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	13582	2,87	6,136	6,136	0,00
15+100,00	5,65	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	8481	3,36	6,136	6,139	0,00
15+300,00	15,08	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	17503	2,63	6,136	6,133	0,00
15+400,00	20,42	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	21313	2,46	6,136	6,138	0,00
15+500,00	5,65	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	8481	3,35	6,136	6,134	0,00
15+600,00	4,72	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	7073	3,55	6,136	6,133	0,00
15+700,00	16,53	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	18575	2,58	6,136	6,137	0,00
16+100,00	7,26	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	10884	3,09	6,136	6,136	0,00
16+300,00	12,17	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	15224	2,76	6,136	6,134	0,00
16+700,00	12,07	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	15146	2,77	6,136	6,140	0,00
17+400,00	3,14	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	4704	4,04	6,136	6,137	0,00
17+500,00	15,64	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	17922	2,61	6,136	6,135	0,00
17+900,00	3,39	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	5089	3,94	6,136	6,135	0,00
18+000,00	11,02	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	14277	2,82	6,136	6,134	0,00
18+100,00	5,65	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	8481	3,35	6,136	6,134	0,00
18+300,00	3,39	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	5089	3,94	6,136	6,135	0,00
18+500,00	4,24	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	6361	3,67	6,136	6,132	0,00
18+600,00	3,84	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	5764	3,79	6,136	6,136	0,00
18+900,00	5,65	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	8481	3,35	6,136	6,134	0,00
19+300,00	3,39	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	5089	3,94	6,136	6,135	0,00
19+400,00	1,71	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	2561	4,86	6,136	6,137	0,00
19+500,00	12,17	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	15225	2,76	6,136	6,134	0,00
19+700,00	1,70	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	2544	4,87	6,136	6,137	0,00
19+900,00	3,39	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	5089	3,94	6,136	6,135	0,00
20+300,00	12,07	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	15146	2,77	6,136	6,140	0,00
21+500,00	11,98	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	15072	2,77	6,136	6,135	0,00
21+700,00	5,94	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	8914	3,30	6,136	6,137	0,00
21+900,00	5,65	1.368.435,31	-1,037	0,45	2,20	8481	3,35	6,136	6,134	0,00

8.9 ANÁLISIS DE LA CARENCIA ESTRUCTURAL.

La carencia estructural se estudia relacionando los números estructurales efectivos o S_{Neff} , con los requeridos o S_{Nreq} .

La relación S_{Neff} / S_{Nreq} , permite establecer si existe o no, carencia estructural.

$$\frac{S_{Neff}}{S_{Nreq}} \geq 1, \text{ No existe carencia estructural}$$

$$\frac{S_{Neff}}{S_{Nreq}} < 1, \text{ Existe carencia estructural}$$

Tabla 29. Análisis de carencia estructural.

ABSCISA	CALZADA	SNef	SNreq (2024)	SNef / SNreq	Análisis de carencia estructural	
2+500,00	L1	Izquierda	2,39	2,25	1,063	No existe carencia estructural
2+600,00	L2	Derecha	2,32	2,29	1,015	No existe carencia estructural
2+700,00	L1	Izquierda	2,38	2,25	1,059	No existe carencia estructural
3+100,00	L1	Izquierda	1,58	2,57	0,615	Existe carencia estructural
4+300,00	L1	Izquierda	2,36	2,48	0,953	Existe carencia estructural
4+400,00	L2	Derecha	2,48	2,74	0,906	Existe carencia estructural
4+500,00	L1	Izquierda	2,54	2,70	0,941	Existe carencia estructural
4+700,00	L1	Izquierda	1,78	2,75	0,646	Existe carencia estructural
4+900,00	L1	Izquierda	2,93	3,31	0,885	Existe carencia estructural
5+200,00	L2	Derecha	2,83	3,71	0,763	Existe carencia estructural
5+300,00	L1	Izquierda	1,43	2,76	0,517	Existe carencia estructural
5+500,00	L1	Izquierda	2,62	2,64	0,994	Existe carencia estructural
5+700,00	L1	Izquierda	1,02	2,85	0,359	Existe carencia estructural
5+900,00	L1	Izquierda	1,63	2,52	0,649	Existe carencia estructural
6+000,00	L2	Derecha	1,54	2,61	0,592	Existe carencia estructural
6+300,00	L1	Izquierda	2,90	2,50	1,162	No existe carencia estructural
6+500,00	L1	Izquierda	0,82	2,55	0,321	Existe carencia estructural
6+900,00	L1	Izquierda	1,95	2,80	0,696	Existe carencia estructural
7+700,00	L1	Izquierda	1,58	3,21	0,491	Existe carencia estructural
7+900,00	L1	Izquierda	1,25	3,11	0,401	Existe carencia estructural
8+300,00	L1	Izquierda	1,94	3,15	0,617	Existe carencia estructural
8+700,00	L1	Izquierda	1,68	3,74	0,448	Existe carencia estructural
9+200,00	L2	Derecha	1,58	2,75	0,573	Existe carencia estructural
9+300,00	L1	Izquierda	0,93	2,68	0,349	Existe carencia estructural
10+100,00	L1	Izquierda	1,30	2,84	0,458	Existe carencia estructural
10+300,00	L1	Izquierda	1,13	2,95	0,382	Existe carencia estructural
10+500,00	L1	Izquierda	1,99	3,27	0,609	Existe carencia estructural
10+700,00	L1	Izquierda	3,13	4,56	0,686	Existe carencia estructural
11+300,00	L1	Izquierda	2,65	3,13	0,847	Existe carencia estructural
12+100,00	L1	Izquierda	1,57	2,84	0,554	Existe carencia estructural
12+700,00	L1	Izquierda	1,73	2,87	0,602	Existe carencia estructural
13+100,00	L1	Izquierda	1,83	2,48	0,738	Existe carencia estructural
13+300,00	L1	Izquierda	1,24	2,72	0,457	Existe carencia estructural
14+300,00	L1	Izquierda	2,81	3,05	0,923	Existe carencia estructural
14+500,00	L1	Izquierda	2,47	2,62	0,944	Existe carencia estructural
14+900,00	L1	Izquierda	2,81	3,05	0,923	Existe carencia estructural
15+000,00	L2	Derecha	1,54	2,87	0,538	Existe carencia estructural
15+100,00	L1	Izquierda	7,21	3,36	2,149	No existe carencia estructural
15+300,00	L1	Izquierda	1,00	2,63	0,380	Existe carencia estructural
15+400,00	L2	Derecha	1,95	2,46	0,791	Existe carencia estructural
15+500,00	L1	Izquierda	7,21	3,35	2,152	No existe carencia estructural
15+600,00	L2	Derecha	2,70	3,55	0,759	Existe carencia estructural
15+700,00	L1	Izquierda	1,44	2,58	0,559	Existe carencia estructural
16+100,00	L1	Izquierda	2,76	3,09	0,893	Existe carencia estructural
16+300,00	L1	Izquierda	1,64	2,76	0,593	Existe carencia estructural
16+700,00	L1	Izquierda	3,02	2,77	1,091	No existe carencia estructural
17+400,00	L2	Derecha	5,92	4,04	1,466	No existe carencia estructural
17+500,00	L1	Izquierda	1,67	2,61	0,639	Existe carencia estructural
17+900,00	L1	Izquierda	6,08	3,94	1,544	No existe carencia estructural
18+000,00	L2	Derecha	1,58	2,82	0,562	Existe carencia estructural
18+100,00	L1	Izquierda	7,21	3,35	2,152	No existe carencia estructural
18+300,00	L1	Izquierda	6,08	3,94	1,544	No existe carencia estructural
18+500,00	L1	Izquierda	6,55	3,67	1,785	No existe carencia estructural
18+600,00	L2	Derecha	6,34	3,79	1,673	No existe carencia estructural
18+900,00	L1	Izquierda	7,21	3,35	2,152	No existe carencia estructural
19+300,00	L1	Izquierda	6,08	3,94	1,544	No existe carencia estructural
19+400,00	L2	Derecha	4,84	4,86	0,995	Existe carencia estructural
19+500,00	L1	Izquierda	1,64	2,76	0,593	Existe carencia estructural
19+700,00	L1	Izquierda	4,83	4,87	0,991	Existe carencia estructural

19+900,00	L1	Izquierda	6,08	3,94	1,544	No existe carencia estructural
20+300,00	L1	Izquierda	3,02	2,77	1,091	No existe carencia estructural
21+500,00	L1	Izquierda	1,31	2,77	0,473	Existe carencia estructural
21+700,00	L1	Izquierda	7,33	3,30	2,222	No existe carencia estructural
21+900,00	L1	Izquierda	7,21	3,35	2,152	No existe carencia estructural

En el 70% de los casos existe carencia estructural. El resultado anterior indica que es necesario reforzar el pavimento en el 70% del tramo de estudio. Si se refiere al resultado de la tabla 25: en el 60% de los casos, indica que **el pavimento no es utilizable, en términos de material granular efectivo**, por lo que requiere refuerzo.

El refuerzo en términos de material granular efectivo, consiste en añadir una capa de material de base granular, aumentando la capa granular del pavimento, lo cual supondría las siguientes actividades:

- Fresado y desalojo de la carpeta asfáltica existente.
- Reconformación y compactación del material granular existente.
- La obtención y transporte del material granular base clase 2. Reconformación y compactación.
- Tendido de nueva carpeta asfáltica.

Este proceso demandaría el movimiento de personal, máquinas y tiempo excesivo que llevaría realizar este trabajo, serían factores que podrían causar congestión vehicular y elevados costos.

8.10 MÓDULO ELÁSTICO DE LA CARPETA ASFÁLTICA EXISTENTE

El módulo resiliente de la carpeta asfáltica existente se determinó mediante ensayos de laboratorio por compresión diametral en los núcleos obtenidos de las calicatas, (Anexo 6). Los valores de los módulos se exponen en la tabla siguiente:

Tabla 29. Módulos resilientes de concreto asfáltico existente.

Abscisa	Temperatura probeta (°C)	Fecha ensayo	Módulo resiliente CAE (MPa)
4+600	10	17/01/2024	2 959
4+600	20	19/01/2024	171
5+700	20	18/01/2024	1 580
5+700	10	17/01/2024	2 891
5+700	40	19/01/2024	560
8+100	20	18/01/2024	2 102
8+100	10	17/01/2024	3 839
8100	40	19/01/2024	630
10+700	20	18/01/2024	8 107
10+700	10	17/01/2024	13 627
10+700	40	19/01/2024	3 243
14+000	20	18/01/2024	1 959
14+000	10	17/01/2024	2 770
14+000	40	19/01/2023	1 247
20+200	10	17/01/2024	5 174
20+200	20	18/01/2024	3 183
20+200	40	19/01/2024	1 437

* CAE significa Concreto asfáltico existente.

Los resultados indican valores puntuales de módulos elásticos muy elevados de carpeta asfáltica. En estos puntos, la capa asfáltica existente es muy rígida y propensa a agrietarse con progreso de fisuras en profundidad, que afecten el material granular existente: ($E_{CAE} 8+100=544 889,23$ psi; $E_{CAE} 20+200 = 734 372$ psi; $E_{CAE} 10+700 = 1'934 151$ psi, son valores excesivamente elevados). *Esta característica se debe a las bajas temperaturas durante el tiempo de servicio del*

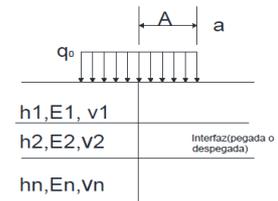
pavimento (O. Agnusdei, A. Iosco, D. Osio, B. Rego, Gutiérrez Pablo, Agosto, 2002). El fisuramiento observado, como ya se indicó en el numeral 2.2 de la Introducción, es probable que se deba a las bajas temperaturas en el transcurso de varios años, recalando que la acción del tránsito también contribuyó al aumento del deterioro. *Cuando la temperatura durante el servicio decrece, el ligante se endurece y contrae, produciéndose esfuerzos de tracción en el pavimento, que cuando superan la resistencia a tracción de la mezcla asfáltica, da lugar a la formación de fisuras* (O. Agnusdei, A. Iosco, D. Osio, B. Rego, Gutiérrez Pablo, Agosto, 2002).

En el Anexo 5, se presenta un reporte fotográfico emitido por el laboratorio de la EPMMOP, de los núcleos de carpeta asfáltica, que exponen profundidad de las fisuras de 5 a 15 cm. Las fisuras no han afectado el espesor total de carpeta existente, pero existe una alta probabilidad de que, dada la elevada rigidez, el espesor remanente de la capa se vea fisurada con el tiempo.

8.11 MÓDULOS ELÁSTICOS DEL MATERIAL GRANULAR EXISTENTE.

Los módulos se obtuvieron mediante retro cálculo, empleando las ecuaciones generalizadas de Palmer y Barber (Castellanos, Juan)

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



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

Los resultados del análisis se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 30. Cálculo de módulos elásticos del material granular existente.

MÓDULO DE POISSON	0,5
DEFLEXIÓN EN EL CENTRO DE LA CARGA =	$w_o = D_o - D_{25}$
RADIO DE HUELLA DEL NEUMÁTICO	$a = 4,24$ pulg.
CARGA APLICADA	$P = 9020$ lb
PRESIÓN DE CONTACTO	$q = 80$ psi

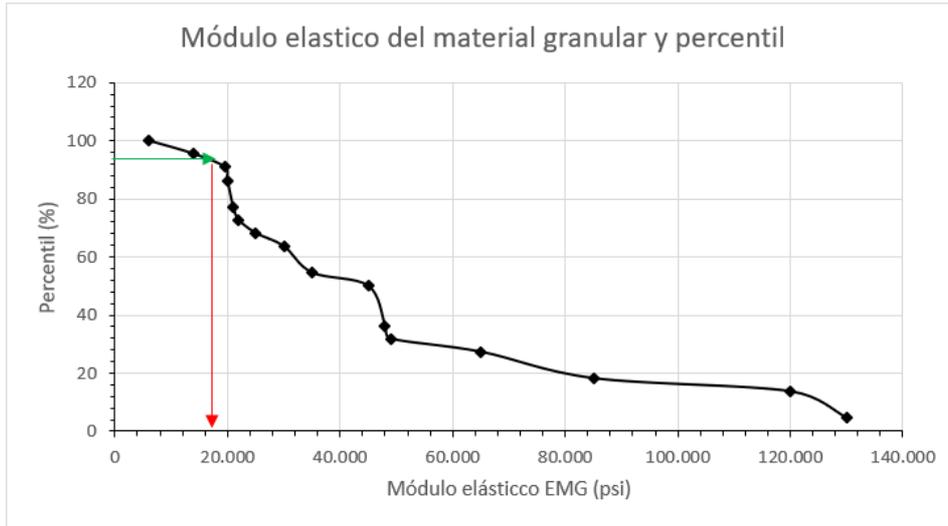
ABSCISA	D_o pulg	D_{25} pulg	$w_o = D_o - D_{25}$ (pulg)	Módulos elásticos (psi)			Espesores capas (pulg)			Módulo equivalente \hat{E} (psi)	w_o (calc) pulg	Diferencia
				E_{CA} existente (E1)	MG existente (E2): iteraciones	Subrasante Esg (E3)	CA existente (h1)	MG existente (h2)	Subrasante h3			
2+500	0,0132	0,005	0,0079	319.306,89	25.000,00	30.308,39	7,1	12,6		81.382,34	0,0079	0,00
2+600	0,014	0,006	0,0085	319.306,89	19.500,00	28.424,23	7,1	12,6		73.291,61	0,0086	0,00
2+700	0,013	0,005	0,0079	319.306,89	20.000,00	30.436,23	7,1	12,6		74.060,85	0,0084	0,00
3+100	0,011	0,006	0,0057	319.306,89	120.000,00	17.082,75	7,1	12,6		177.325,34	0,0055	0,00
4+300	0,013	0,008	0,01	319.306,89	85.000,00	20.189,08	7,1	12,6		146.825,87	0,0059	0,00
4+400	0,014	0,009	0,01	319.306,89	130.000,00	12.908,43	7,1	12,6		185.526,04	0,0060	0,00
4+500	0,026	0,011	0,0159	222.128,59	6.000,00	13.827,68	7,1	12,6		37.424,50	0,0171	0,00
4+700	0,026	0,017	0,01	319.306,89	45.000,00	12.698,91	7,1	12,6		106.383,85	0,0085	0,00
4+900	0,029	0,016	0,0132	319.306,89	21.000,00	6.991,86	7,1	12,6		75.577,14	0,0131	0,00
5+200	0,031	0,023	0,01	224.257,00	35.000,00	4.867,20	7,1	12,6		78.501,78	0,01	0,01
5+300	0,026	0,016	0,0106	224.257,00	30.000,00	12.580,00	7,1	12,6		72.878,23	0,0110	0,00
5+500	0,034	0,023	0,0113	224.257,00	30.000,00	15.293,47	7,1	12,6		72.878,23	0,0103	0,00
5+700	0,016	0,008	0,0079	224.257,00	65.000,00	10.939,19	7,1	12,6		107.937,12	0,0089	0,00

5+900	0,020	0,011	0,0085	224.257,00	45.000,00	18.881,38	7,1	12,6	88.992,18	0,0084	0,00
6+000	0,016	0,008	0,0079	224.257,00	49.000,00	15.937,57	7,1	12,6	92.966,86	0,0086	0,00
6+300	0,023	0,014	0,0085	224.257,00	48.000,00	19.365,51	7,1	12,6	91.983,38	0,0082	0,00
6+500	0,024	0,013	0,0106	224.257,00	22.000,00	17.660,54	7,1	12,6	63.131,05	0,0110	0,00
6+900	0,023	0,014	0,0085	224.257,00	65.000,00	11.670,24	7,1	12,6	107.937,12	0,0087	0,00
7+700	0,019	0,008	0,0106	224.257,00	45.000,00	7.696,42	7,1	12,6	88.992,18	0,0114	0,00
7+900	0,026	0,011	0,0142	224.257,00	20.000,00	8.414,98	7,1	12,6	60.502,77	0,0142	0,00
8+300	0,024	0,011	0,0132	310.885,40	14.000,00	8.140,29	7,1	12,6	63.188,63	0,0139	0,00
8+700	0,048	0,040	0,0085	310.885,40	120.000,00	5.787,68	7,1	12,6	175.264,44	0,0088	0,00
9+200	0,032	0,013	0,0185	282.734,92	3.800,00	16.957,89	8	18	29.786,28	0,0188	0,00
9+300	0,051	0,028	0,0227	282.734,92	1.900,00	19.231,74	8	18	23.812,38	0,0221	0,00
10+100	0,036	0,017	0,0192	282.734,92	2.400,00	14.745,89	8	18	25.578,60	0,0219	0,00
10+300	0,031	0,020	0,0113	282.734,92	25.000,00	12.293,75	8	18	66.126,32	0,0108	0,00
10+500	0,041	0,022	0,0192	282.734,92	3.500,00	8.756,62	8	18	28.952,08	0,0220	0,00
10+700	0,048	0,023	0,0255	282.734,92	5.000,00	3.034,34	8	18	32.870,28	0,0267	0,00
11+300	0,036	0,014	0,0215	282.734,92	3.500,00	10.044,16	8	18	28.952,08	0,0213	0,00
12+100	0,026	0,017	0,0085	282.734,92	40.000,00	16.835,55	8	18	84.440,17	0,0083	0,00
12+700	0,022	0,010	0,0120	282.734,92	10.000,00	15.957,47	8	18	43.281,57	0,0141	0,00
13+100	0,026	0,014	0,0113	282.734,92	18.000,00	30.676,94	8	18	56.351,75	0,0100	0,00
13+300	0,045	0,017	0,0287	282.734,92	300,00	20.221,72	8	18	15.307,49	0,0318	0,00
14+300	0,020	0,011	0,0085	282.734,92	55.000,00	12.024,58	8	18	100.694,53	0,0080	0,00
14+500	0,024	0,010	0,0144	327.870,31	5.000,00	24.033,96	8	18	36.117,96	0,0151	0,00
14+900	0,028	0,011	0,0170	327.870,31	6.000,00	12.024,58	8	18	38.604,42	0,0164	0,00
15+000	0,038	0,024	0,0144	327.870,31	4.500,00	15.940,14	8	18	34.795,24	0,0168	0,00
15+100	0,045	0,023	0,0227	327.870,31	3.500,00	8.827,42	8	18	31.940,32	0,0203	0,00
15+300	0,017	0,007	0,0096	327.870,31	15.000,00	23.546,14	8	18	56.141,31	0,0106	0,00
15+400	0,037	0,028	0,0085	327.870,31	22.100,00	31.880,28	8	18	67.146,60	0,0086	0,00
15+500	0,026	0,007	0,0192	327.870,31	4.000,00	8.827,42	8	18	33.407,10	0,0196	0,00
15+600	0,026	0,014	0,0113	327.870,31	28.000,00	7.362,33	8	18	75.362,89	0,0114	0,00
15+700	0,019	0,012	0,0072	327.870,31	28.900,00	25.801,84	8	18	76.562,12	0,0081	0,00
16+100	0,026	0,017	0,0085	327.870,31	50.000,00	11.336,64	8	18	101.990,49	0,0081	0,00
16+300	0,032	0,013	0,0188	327.870,31	2.500,00	18.998,43	8	18	28.689,32	0,0190	0,00
16+700	0,014	0,009	0,0057	327.870,31	85.000,00	18.848,92	8	18	137.840,63	0,0056	0,00
17+400	0,032	0,021	0,0107	327.870,31	46.000,00	4.896,01	8	18	97.480,28	0,0111	0,00
17+500	0,031	0,023	0,0085	327.870,31	30.000,00	24.419,70	8	18	78.011,09	0,0081	0,00
17+900	0,030	0,019	0,0107	327.870,31	50.000,00	5.296,45	8	18	101.990,49	0,0105	0,00
18+000	0,034	0,026	0,0085	327.870,31	35.000,00	17.212,21	8	18	84.389,88	0,0083	0,00
18+100	0,032	0,021	0,0107	327.870,31	28.500,00	8.827,42	8	18	76.030,69	0,0107	0,00
18+300	0,020	0,014	0,0057	327.870,31	210.000,00	5.296,45	8	18	242.588,03	0,0064	0,00
18+500	0,051	0,021	0,0295	203.960,88	2.900,00	6.620,56	8	18	21.915,73	0,0291	0,00
18+600	0,028	0,020	0,0085	203.960,88	78.000,00	5.999,73	8	18	108.476,13	0,0097	0,00
18+900	0,054	0,021	0,0322	203.960,88	2.000,00	8.827,42	8	18	19.323,26	0,0302	0,00
19+300	0,023	0,014	0,0085	203.960,88	145.000,00	5.296,45	8	18	161.726,83	0,0080	0,00
19+400	0,081	0,048	0,0322	203.960,88	4.000,00	2.665,88	8	18	24.646,40	0,0338	0,00
19+500	0,023	0,011	0,0113	203.960,88	25.000,00	19.001,49	8	18	56.425,00	0,0110	0,00
19+700	0,043	0,019	0,0242	203.960,88	15.000,00	2.647,79	8	18	43.561,23	0,0232	0,00
19+900	0,021	0,013	0,0080	451.779,74	100.000,00	5.296,45	8	18	173.217,35	0,0077	0,00
20+300	0,067	0,038	0,0295	203.960,88	1.000,00	18.848,92	8	18	15.690,80	0,0315	0,00
21+500	0,019	0,011	0,0080	203.960,88	48.000,00	18.708,09	8	18	81.025,90	0,0084	0,00
21+700	0,062	0,027	0,0349	203.960,88	1.200,00	9.278,00	8	18	16.520,65	0,0340	0,00
21+900	0,037	0,029	0,0080	203.960,88	88.000,00	8.827,42	8	18	116.969,89	0,0080	0,00

8.11.1 Módulos E_{mg} para diseño:

El módulo del material granular existente, se determinó mediante la metodología que recomienda el Instituto del Asfalto para calcular el CBR de diseño, que está en función del número de ejes equivalentes a 18000 lb: De la tabla 26: para ESAL > 10⁶, debe elegirse el percentil 87,6 %. En este sentido, se tiene:

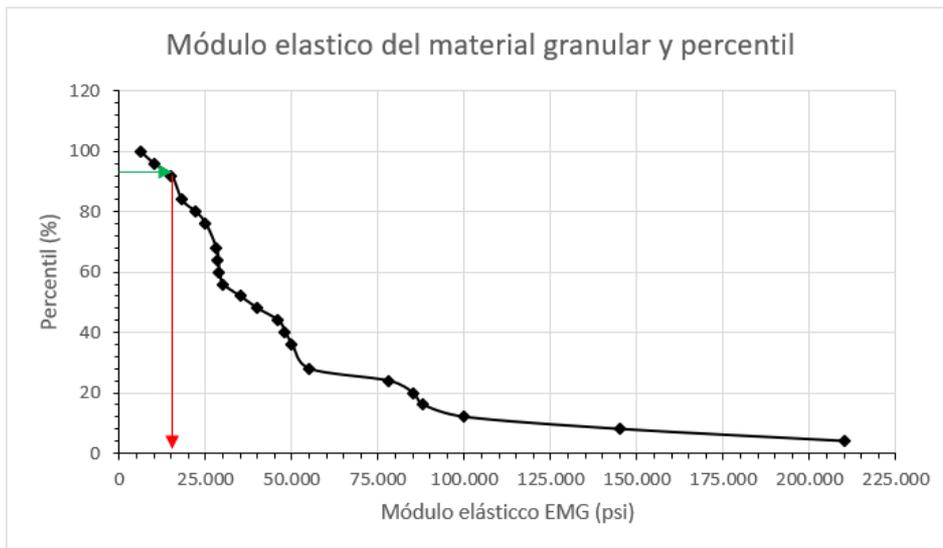
Tramo 2+700 – 8+420:



$$E_{MG_diseño} = \boxed{17000} \text{ psi}$$

Gráfico 29.

Tramo 8+420 – 22+297,47:



$$E_{MG_diseño} = \boxed{15000} \text{ psi}$$

Gráfico 30.

8.12 SOLUCIÓN ADOPTADA PARA LA REHABILITACIÓN

Se adoptó como solución para la rehabilitación, la colocación de carpeta asfáltica sobre base reciclada y estabilizada con *cemento hidráulico de moderado calor de hidratación*, en un espesor que permita recuperar y mejorar las propiedades mecánicas, impermeabilizar y dotar de mayor cohesión al material granular existente.

Los elevados módulos de rigidez obtenidos de los ensayos (Anexo 6), indican que el concreto asfáltico es frágil en zonas puntuales.

La rehabilitación no contempla intervenir en los pasos deprimidos (Paseo San Francisco) y Centro Comercial Scala. Debido a la elevada concentración vehicular en estos sitios, no fue posible realizar las evaluaciones funcional y estructural del pavimento. Las obras que se detallan

corresponden a nivel de superficie, que es donde se realizó la evaluación estructural del pavimento con deflectometría y funcional con el cálculo del Índice PCI.

Es necesario realizar el fresado y desalojo de la carpeta existente para conseguir estabilizar el material granular. Sobre esta base estabilizada, se colocará carpeta asfáltica nueva, en el espesor e establece en el presente diseño.

En los siguientes tramos (resaltados en tabla 30), los módulos son excesivamente bajos (< 9000 psi → CBR < 10 según diagrama de correlación (AASHTO, 1993), estando fuera de norma para uso como subbase clase 3):

Km 9+200 – 9+300: Módulos entre 1900 a 3800 psi

Km 10+500 – 10+700: Módulos entre 3500 a 5000 psi

Km 14+500 – 15+100: Módulos entre 3500 a 6000 psi

Los valores bajos de módulos elásticos, no se incluyeron en análisis del percentil de diseño.

Entre las abscisas indicadas, es necesario excavar y desalojar el espesor de 40 cm del material granular existente, dado que no cumple con especificaciones para subbase clase 3. **Debe ser reemplazado por material seleccionado, que cumpla con las especificaciones para subbase clase 3 (MOP, 2002), para posteriormente colocar material granular tipo base clase 2 y realizar la mezcla con cemento, a fin de homogenizar la estructura del pavimento.**

9. DISEÑO DE ESPESORES.

En el diseño que se expone: CA significa “Concreto asfáltico (o carpeta asfáltica)”, y MG significa “material granular”.

9.1 COEFICIENTE DE CAPAS.

Coeficiente estructural de la capa de concreto asfáltico a₁:

Con el valor del módulo de elasticidad del concreto asfáltico, entrando en la gráfica (figura 10), se determinó el coeficiente estructural a₁ para el concreto asfáltico, considerando el módulo elástico de **350000 psi** (a 68° F)

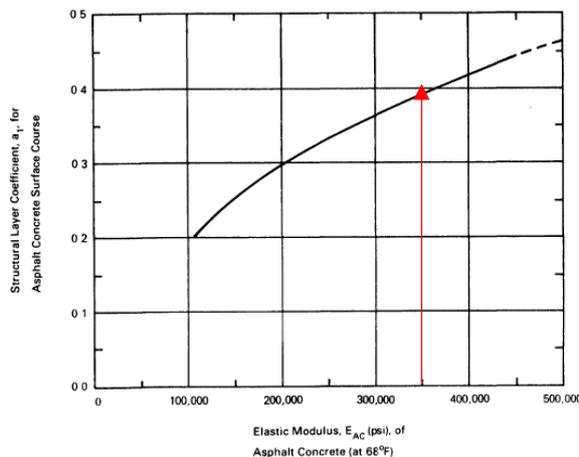


Figura 10. Coeficiente estructural a₁ para concreto asfáltico (fuente: (AASHTO, 1993))

$$a_1 = 0.40$$

Coeficiente estructural para la capa granular tratada con cemento: Entrando en la gráfica (figura 11), con resistencia a la compresión a 7 días = 600 psi (42 kg/cm²), corresponde un módulo de elasticidad de **E_b = 700000 psi**, y coeficiente **a₂ = 0,19**

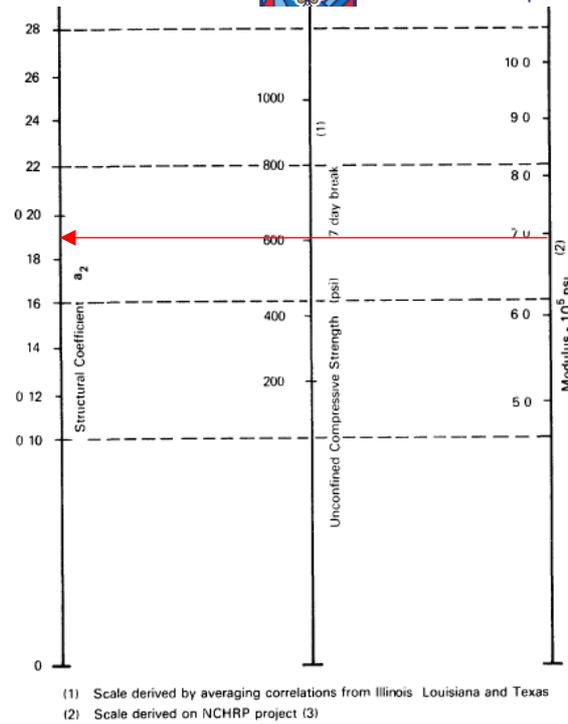


Figura 11. Variación de a_2 , para bases tratadas con cemento (Fuente: (AASHTO, 1993)).

Coefficiente estructural para la capa granular remanente (tipo subbase clase 3):

Entrando en la figura 12: para $E_{sb}= 17000 \text{ psi}$ y $E_{sb}=15000\text{psi}$, el coeficiente estructural para cada tramo (2+700 – 8+420 y 8+420 – 22+297,47) es:

$a_3 = 0,12$ y $0,11$ respectivamente.

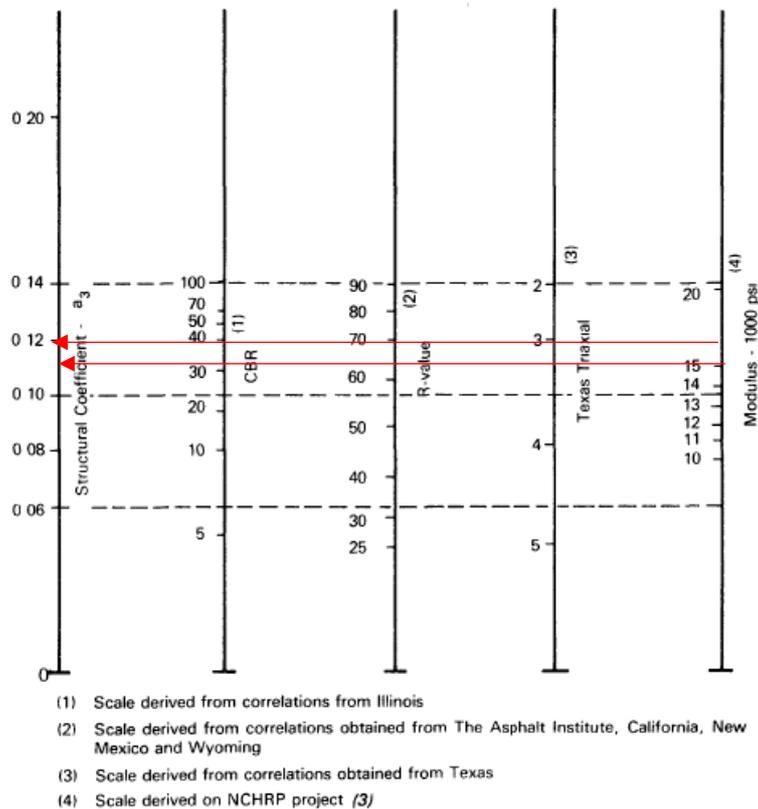


Figura 12. Variación de a_3 , para material de subbase (Fuente: (AASHTO, 1993)).

En los tramos indicados, donde los módulos elásticos del material granular existente son bajos, es necesario excavar y desalojar el espesor existente de 40 cm (tabla 24, espesores de capa promedio) de este material granular, para colocar material seleccionado de subbase clase 3, de espesor 25 cm y base granular nueva clase 2, espesor=15 cm, la cual debe mezclarse con cemento para homogenizar la estructura de la vía.

Coefficiente de drenaje.

El coeficiente de drenaje (m_i) es el valor que estima los efectos de los niveles o calidad de drenaje en los materiales para el rendimiento del pavimento.

En la siguiente tabla, se muestran los valores recomendados para el coeficiente de drenaje, valores que dependen de la propiedad del material para liberar el agua entre sus partículas, en función al tiempo durante el cual la estructura de pavimento está expuesta a niveles de humedad próximos a la saturación.

Tabla 31. Coeficientes de drenaje (fuente: (AASHTO, 1993)).

CALIDAD DEL DRENAJE	PORCENTAJE DE TIEMPO CON LA ESTRUCTURA EXPUESTA A NIVELES DE HUMEDAD PRÓXIMOS A LA SATURACIÓN			
	< 1%	1 - 5%	5 - 25%	> 25%
Excelente	1,40-1,35	1,35-1,30	1,30-1,20	1.2
Bueno	1,35-1,25	1,25-1,15	1,15-1,00	1.0
Regular	1,25-1,15	1,15-1,05	1,00-0,80	0.8
Pobre	1,15-1,05	1,05-0,80	0,80-0,60	0.6
Muy pobre	1,05-0,95	0,95-0,75	0,75-0,40	0.4

De acuerdo al cuadro anterior, para la capa granular tratada con cemento se adoptó el factor $m_2=1.00$ y para el material granular, se adoptó $m_3 = 0.80$, para un porcentaje de tiempo de saturación del 25% (calidad regular de drenaje)

9.2 CÁLCULO DEL NÚMERO ESTRUCTURAL PARA EL PAVIMENTO (SN)

La ecuación fundamental propuesta por la AASHTO es:

$$\log_{10}W_t18 = Z_R * S_o + 9.36 * \log_{10}(SN + 1) - 0.20 + \frac{\log_{10} \left[\frac{\Delta PSI}{4.2 - 1.5} \right]}{0.40 + \frac{1094}{(SN + 1)^{5.19}}} + 2.32 * \log_{10}M_r - 8.07 \quad (20)$$

A su vez, SN se relaciona con los espesores y coeficientes de capas mediante:

$$SN = a_1D_1 + a_2m_2D_2 + a_3m_3D_3 \quad (21)$$

, en la cual: D_1 = espesor de concreto asfáltico; D_2 = espesor de material de base (mat. Granular tratado con cemento); D_3 = espesor de material granular existente (subbase granular clase 3).

El número estructural $SN_{requerido}$ para el período de 10 años (año 2034), se calculó para cada abscisa mediante (20)

Aplicando la metodología (AASHTO, 1993), a partir de la ecuación fundamental (20), adoptando los términos descritos en el acápite 8.8, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 32. Número estructural requerido al año 2034.

Abscisa	CBR (%)	W_{18}	Z_R	S_o	ΔPSI	M_R (psi)	SN_{req}	Miembro izq ec. 20 (log W_{18})	Miembro der ec.20	Diferencia
2+500,00	19,41	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	20624	2,74	6,419	6,419	0,00
2+600,00	18,21	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	19781	2,78	6,419	6,420	0,00
2+700,00	19,49	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	20681	2,74	6,419	6,421	0,00
3+100,00	10,94	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	14208	3,15	6,419	6,463	0,0
4+300,00	12,93	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	15837	3,04	6,419	6,464	0,0
4+400,00	8,27	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	11842	3,30	6,419	6,424	0,0
4+500,00	8,86	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	12384	3,29	6,419	6,459	0,0
4+700,00	8,13	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	11717	3,35	6,419	6,460	0,0
4+900,00	4,48	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	6717	3,95	6,419	6,423	0,00
5+200,00	3,12	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	4676	4,41	6,419	6,419	0,00
5+300,00	8,06	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	11645	3,31	6,419	6,416	0,00
5+500,00	9,80	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	13222	3,18	6,419	6,420	0,00
5+700,00	7,01	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	10510	3,42	6,419	6,415	0,00
5+900,00	12,09	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	15163	3,04	6,419	6,420	0,00
6+000,00	10,21	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	13581	3,15	6,419	6,418	0,00
6+300,00	12,40	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	15414	3,02	6,419	6,417	0,00
6+500,00	11,31	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	14518	3,08	6,419	6,416	0,00
6+900,00	7,47	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	11091	3,36	6,419	6,414	0,01
7+700,00	4,93	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	7394	3,83	6,419	6,420	0,00
7+900,00	5,39	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	8085	3,72	6,419	6,417	0,00
8+300,00	5,21	2.623.039,96	-1,037	0,45	2,20	7821	3,76	6,419	6,418	0,00
8+700,00	3,71	4.085.933,99	-1,037	0,45	2,20	5560	4,44	6,611	6,616	0,00
9+200,00	10,86	4.085.933,99	-1,037	0,45	2,20	14140	3,31	6,611	6,612	0,00
9+300,00	12,32	4.085.933,99	-1,037	0,45	2,20	15345	3,22	6,611	6,609	0,00
10+100,00	9,44	4.085.933,99	-1,037	0,45	2,20	12912	3,41	6,611	6,613	0,00
10+300,00	7,87	4.085.933,99	-1,037	0,45	2,20	11472	3,54	6,611	6,612	0,00
10+500,00	5,61	4.085.933,99	-1,037	0,45	2,20	8413	3,90	6,611	6,609	0,00
10+700,00	1,94	4.085.933,99	-1,037	0,45	2,20	2915	5,38	6,611	6,613	0,00
11+300,00	6,43	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	9650	3,84	6,695	6,697	0,00
12+100,00	10,78	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	14074	3,40	6,695	6,691	0,00
12+700,00	10,22	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	13592	3,44	6,695	6,692	0,00
13+100,00	19,65	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	20787	3,00	6,695	6,698	0,00
13+300,00	12,95	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	15854	3,28	6,695	6,699	0,00
14+300,00	7,70	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	11308	3,65	6,695	6,694	0,00
14+500,00	15,39	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	17738	3,16	6,695	6,697	0,00
14+900,00	7,70	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	11308	3,65	6,695	6,694	0,00
15+000,00	10,21	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	13582	3,44	6,695	6,692	0,00
15+100,00	5,65	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	8481	4,00	6,695	6,699	0,00
15+300,00	15,08	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	17503	3,17	6,695	6,693	0,00
15+400,00	20,42	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	21313	2,97	6,695	6,693	0,00
15+500,00	5,65	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	8481	4,00	6,695	6,699	0,00
15+600,00	4,72	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	7073	4,23	6,695	6,698	0,00
15+700,00	16,53	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	18575	3,11	6,695	6,694	0,00
16+100,00	7,26	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	10884	3,70	6,695	6,699	0,00
16+300,00	12,17	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	15224	3,32	6,695	6,696	0,00
16+700,00	12,07	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	15146	3,33	6,695	6,700	0,00
17+400,00	3,14	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	4704	4,78	6,695	6,693	0,00
17+500,00	15,64	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	17922	3,15	6,695	6,697	0,00
17+900,00	3,39	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	5089	4,67	6,695	6,695	0,00
18+000,00	11,02	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	14277	3,39	6,695	6,696	0,00
18+100,00	5,65	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	8481	4,00	6,695	6,699	0,00
18+300,00	3,39	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	5089	4,67	6,695	6,695	0,00
18+500,00	4,24	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	6361	4,37	6,695	6,699	0,00
18+600,00	3,84	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	5764	4,50	6,695	6,697	0,00
18+900,00	5,65	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	8481	4,00	6,695	6,699	0,00
19+300,00	3,39	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	5089	4,67	6,695	6,695	0,00
19+400,00	1,71	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	2561	5,73	6,695	6,699	0,00
19+500,00	12,17	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	15225	3,32	6,695	6,696	0,00
19+700,00	1,70	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	2544	5,74	6,695	6,698	0,00
19+900,00	3,39	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	5089	4,67	6,695	6,695	0,00
20+300,00	12,07	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	15146	3,32	6,695	6,690	0,00
21+500,00	11,98	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	15072	3,33	6,695	6,695	0,00
21+700,00	5,94	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	8914	3,94	6,695	6,700	0,00
21+900,00	5,65	4.953.926,48	-1,037	0,45	2,20	8481	4,00	6,695	6,699	0,00

Para un nivel de confianza determinado, los números estructurales requeridos se calcularon mediante:

$$SN_{req} = SN_{prom} \pm Z\sigma \quad (24)$$

, siendo Z=coeficiente de acuerdo al nivel de confianza elegido, σ la desviación estándar y SN_{prom} el número estructural promedio.

Se adoptó nivel de confianza 80% $\rightarrow Z=1$.

Los valores SN_{prom} y σ se calcularon para cada tramo establecido según los parámetros estadísticos obtenidos, y los resultados fueron los siguientes:

Tabla 33. Número estructural requerido por tramos, Z=1 (nivel de confianza 80%)

Tramo	SN_{prom}	σ	$SN_{req} (t=2034)$
2+700 – 8+420	3,32	0,42	3,74
8+420 – 22+297,47	3,86	0,71	4,57

9.3 TRAMO 2+700 – 8+420

9.3.1 Cálculo del espesor requerido de concreto asfáltico (D_1).

Entrando en la ecuación fundamental, con el módulo elástico de la base cemento ($E_b=700000\text{psi}$), se calculó el número estructural SN_1 como sigue:

$E_b =$ Módulo de elasticidad de la base reciclada con cemento

W_{18}	Z_R	S_o	ΔPSI	E_b (psi)	m_2	SN_1	Miembro izq. (log W18)	Miembro der.	Error
2.623.039,96	-1,04	0,49	2,20	700000	0,80	0,515	6,42	6,42	0,00

$$SN_1 = 0,515$$

En concepto, la base cemento es la capa que soporta el concreto asfáltico, por lo que, para calcular su espesor, se utiliza el módulo de la base cemento.

Tomando en cuenta que: $SN_1 = a_1 D_1 \rightarrow D_1 = SN_1 / a_1 = 0,515 / 0,40 = 1,29$ pulg.

La AASHTO recomienda espesores mínimos de carpeta asfáltica y base granular, en función del número de ejes equivalentes.

Tabla 34. Espesores mínimos recomendados por AASHTO (en pulgadas)

No. Ejes equivalentes (millones)	Concreto asfáltico	Base granular
< 0,05	1,0 o Tratamiento superficial	4,0
0,05 – 0,15	2,0	4,0
0,15 – 0,50	2,5	4,0
0,50 – 2,00	3,0	6,0
2,00 – 7,00	3,5	6,0
> 7,00	4,0	6,0

Para ESAL = 2'623039,96, corresponde espesor mínimo de CA de 3,5 pulgadas.

Se adoptó para carpeta asfáltica, espesor de 6 pulgadas (15 cm), con el objetivo de no modificar excesivamente los niveles originales de la calzada, debido al fresado e= 20 cm de la carpeta existente.

Fresado espesor = 6 pulgadas, espesor adoptado de CA: $D_1 = 6$ pulgadas (15 cm).

Espesor adoptado de carpeta asfáltica $D_1 = 15$ cm (6 pulgadas). Con esto, el SN_1 debe ser corregido:

$$SN_{1\text{corregido}} = a_1 \times D_1 = 0.4 \times 6 = 2,4$$

9.3.2 Cálculo del espesor de la capa granular tratada con cemento (Base) (D_2): reciclado de material granular existente con incorporación de cemento de moderado calor de hidratación.

Entrando a la ecuación fundamental, con el módulo elástico del material granular existente:

Esb = 17000 psi:

E_{MG} = Módulo de elasticidad del material granular existente (subbase clase 3)

W_{18}	Z_R	S_o	ΔPSI	Esb (psi)	m_2	m_3	SN_2	(1) Miembro izq. (log W18)	(2) Miembro der.	(2) - (1) Diferencia
2.623.039,96	-1,04	0,49	2,20	17000	1,00	0,80	2,970	6,42	6,42	0,00

$$SN_2 = \boxed{2,97}$$

Como $SN_{1\text{corregido}} = 2.40 \rightarrow SN_{2_base\ reciclada\ cemento} = 2,97 - 2.40 = 0,57$

$$SN_{2(base\ cemento)} = a_2 m_2 D_2$$

$$D_2 = SN_{2\text{basecem}} / a_2 m_2 = 0,57 / (0,19 \times 1,0) = 3,0\text{ pulg.}$$

Espesor adoptado = 6 pulgadas, mínimo recomendado por la AASHTO, y corresponde al máximo especificado para bases estabilizadas con cemento.

$D_2 = 6$ pulgadas.

$$SN_{2\text{ base cem corregido}} = a_2 \times D_2 \times m_2 = 0.19 \times 6 \times 1 = 1,14$$

9.3.3 Cálculo del espesor requerido de subbase clase 3 (material granular existente).

Se calculó a partir del número estructural total del pavimento, del concreto asfáltico y de la base cemento:

$$SN_{3(subbase)} = SN_{(TOTALreq)} - (SN_{1corr} + SN_{2(base\ cemento)corr}) = 3,74 - (2,40 + 1,14) = 0,20$$

$$SN_3 = a_3 m_3 D_3$$

$$D_3 = SN_3 / (a_3 m_3) = 0,20 / (0,12 \times 0,80) = 1,90\text{ pulg.}$$

Resultó para la subbase, espesor de 2 pulgadas (5 cm).

$D_3 = 5,0$ cm.

De la tabla 24, se establecieron espesores promedios de CA y MG en el tramo 2+700 – 8+420. La figura 13 expone el proceso de conformación del paquete estructural de diseño, que se muestra en el esquema de la derecha:



(Diseño)

Figura 13. Paquete estructural Tramo 2+700 – 8+420.

El material granular remanente tiene espesor de 24 cm. El número estructural de diseño, calculado aplicando (21) es el siguiente:

Capa	Espesor Di (pulg)	a_i	m_i	$a_i \times m_i \times D_i$
CA	6,0	0,40	1	2,40
Reciclado con cemento	6,0	0,19	1	1,14
Mat. Granular remanente	9,45	0,12	0,8	0,91

$$SN_{\text{diseño}} = 4,45$$

Se verifica que: $SN_{\text{diseño}} = 4.45 > SN_{\text{requerido}} = 3,74$ (tabla 33).

9.4 TRAMO 8+420 -22+297,47.

9.4.1 Cálculo del espesor requerido de concreto asfáltico.

En este tramo: $ESAL = 4'953926,48$.

Entrando en la ecuación fundamental (20), con el módulo elástico de la base cemento ($E_b = 700000 \text{ psi}$), se calculó el número estructural SN_I como sigue:

$E_b =$ Módulo de elasticidad de la base reciclada con cemento

W_{18}	Z_R	S_o	$APSI$	E_b (psi)	m_I	SN_I	(1)	(2)	(2) - (1)
							Miembro izq. (log W18)	Miembro der.	Diferencia
4.953.926,48	-1,04	0,49	2,20	750000	1,00	0,600	6,69	6,70	0,00

$$SN_I = \boxed{0,600}$$

Tomando en cuenta que: $SN_I = a_1 D_1 \rightarrow D_1 = SN_I / a_1 = 0,60 / 0,40 = 1,50$ pulg.

Dado que, en este tramo la carpeta asfáltica existente tiene espesor de 20 cm (8 pulgadas), al fresar, el nivel de la calzada original se verá más reducido, lo cual presenta inconvenientes ya que este tramo se desarrolla entre zonas pobladas (Cumbayá, Tumbaco y Puembo). En ese sentido, se adoptó espesor de 7 pulgadas (17,5 cm) para la carpeta nueva, para homogenizar niveles, y cumplir el requerimiento de (AASHTO, 1993): espesor mínimo para $ESAL > 2$ millones = 3,5 pulgadas (tabla 34).

Fresado espesor = 8 pulgadas, Espesor carpeta asfáltica $D_1 = 7$ pulgadas

$$SN_{I\text{correctado}} = a_1 \times D_1 = 0,4 \times 7 = 2,8$$

9.4.2 Cálculo del espesor de la capa granular tratada con cemento (Base) (D_2): reciclado de material granular existente con incorporación de cemento hidráulico de moderado calor de hidratación.

Entrando a la ecuación fundamental (20), con el módulo elástico del material granular existente (subbase clase 3): **$E_{sb} = 15000 \text{ psi}$** :

Esb = Módulo de elasticidad del material granular existente (subbase clase 3):

W_{18}	Z_R	S_o	ΔPSI	Esb (psi)	m_2	m_3	SN_2	Miembro izq. (log W18)	Miembro der.	Diferencia
4.953.926,48	-1,04	0,49	2,20	15000	1,00	0,80	3,380	6,69	6,70	0,00

$$SN_2 = \boxed{3,38}$$

Como $SN_{1\text{correctado}} = 2.80 \rightarrow SN_{2_base\text{ reciclada cemento}} = 3.38 - 2.80 = 0,58$

$$SN_{2(base\ cemento)} = a_2 m_2 D_2$$

$$D_2 = SN_{2\text{basecem}} / a_2 m_2 = 0,58 / (0,19 \times 1,0) = 3,05\text{ pulg.}$$

Se adoptó espesor = 6 pulgadas, que corresponde al máximo especificado para bases estabilizadas con cemento, y mayor al mínimo recomendado por el Instituto del Asfalto (tabla 34).

$D_2 = 6$ pulgadas.

$$SN_{2\text{ base cemcorrectado}} = a_2 \times D_2 \times m_2 = 0.19 \times 6 \times 1 = 1,14$$

9.4.3 Cálculo del espesor requerido de subbase clase 3 (material granular existente).

Se calculó a partir del número estructural total del pavimento, del concreto asfáltico y de la base cemento:

$$SN_{3(subbase)} = SN_{(TOTALreq)} - (SN_{1corr} + SN_{2(base\ cemento)corr}) = 4,57 - (2,80 + 1,14) = 0,63$$

$$SN_3 = a_3 m_3 D_3$$

$$D_3 = SN_3 / (a_3 m_3) = 0,63 / (0,11 \times 0,80) = 7,16\text{ pulg.}$$

Resultó para la subbase, espesor de 7,16 pulgadas (18 cm).

$D_3 = 7,16$ pulgadas.

De la tabla 24, se establecieron espesores promedios de CA y MG en el tramo 8+420 – 22+297,47. El proceso de conformación del paquete estructural se muestra como sigue:



(Diseño)

Figura 13. Paquetes estructurales para pavimento.

En la figura 13: El material granular remanente tiene espesor de 25 cm > 23,09 cm (requerido) El número estructura de diseño, calculado mediante (21) es el siguiente:

Capa	Espesor D_i (pulg)	a_i	m_i	$a_i \times m_i \times D_i$
CA	7,0	0,40	1	2,80
Reciclado con cemento	6,0	0,19	1	1,14
Mat. Granular remanente	9,84	0,11	0,80	0,87

$$SN_{\text{diseño}} = 4,81$$

Se verifica que: $SN_{\text{diseño}} = 4,81 > SN_{\text{requerido}} = 4,57$ (tabla 33).

9.5 CÁLCULO ESTIMADO DEL PESO DE CEMENTO PARA ESTABILIZAR EL MATERIAL RECICLADO (*Cemento hidráulico de moderado calor de hidratación*).

La estabilización del material reciclado se realizará incorporando *cemento hidráulico de moderado calor de hidratación*, en un porcentaje aproximado del 3,5% en peso del material reciclado. Con el porcentaje de cemento de 3,5% se espera obtener resistencias a la compresión del material base cemento, de 40 kg/cm² (600 psi) a los 7 días de curado.

9.5.1 MÁXIMA DENSIDAD SECA Y HUMEDAD ÓPTIMA.

Es razonable estimar, para el material granular existente, densidad máxima densidad seca de 1800 kg/m³

Por lo general, se recomienda utilizar el 3,5 al 4,5 % de cemento en peso del material reciclado (calculado en función de su máxima densidad seca), que permita obtener una resistencia máxima a la compresión de **42 kg/cm² a los 7 días (600psi), pero no menor a 25 kg/cm²**. Porcentajes de cemento muy elevados, producirán resistencias a la compresión muy altas en la base, que rigidizarían de manera excesiva esta capa dando lugar a fisuras que, con el tiempo, se reflejarían en la capa asfáltica.

9.5.2 PESO DE CEMENTO A AÑADIR.

La cantidad de toneladas de cemento hidráulico de moderado calor de hidratación se calcula como sigue:

$$\text{Peso de cemento a añadir} = (\text{Densidad máxima seca}) \times \text{Volumen reciclado} \times (\% \text{ en peso de cemento})$$

Las cantidades estimadas de cemento se calcularon para cada subtramo del estudio, con base en las áreas de calzada tomadas del Anexo 1 (Topografía), y son las siguientes:

Tramo 2+700 – 8+420:

Área de reciclado (m²) = 93848,62m²

Espesor (m) = 0,15 m

Máxima densidad seca = 1800 kg/m³

% de cemento (moderado calor de hidratación) = 3,5

$$\text{Peso de cemento} = (3,5/100) \times (93848,62 \times 0,15 \times 1800) / 1000 = 887 \text{ Ton}$$

Tramo 8+420 – 22+297,472:

Área de reciclado (m²) = 248984,44m²

Espesor (m) = 0,15 m

Máxima densidad seca = 1800 kg/m³

% de cemento (moderado calor de hidratación) = 3,5

$$\text{Peso de cemento} = (3,5/100) \times (248984,44 \times 0,15 \times 1800) / 1000 = 2353 \text{ Ton}$$

Previa la construcción, se deberá presentar la fórmula maestra de obra, que incluya el Proctor del material reciclado, el porcentaje de cemento óptimo a añadir en la mezcla y la granulometría del material reciclado, que deberá ajustarse a las fajas granulométricas especificadas por el (MOP, 2002).

En ese sentido, previo a la construcción, deben confeccionarse varias muestras en moldes metálicos, incorporando varios porcentajes de cemento en el material reciclado, agregando la

cantidad de agua para obtener la humedad óptima, realizar la compactación en laboratorio y ensayar las muestras a compresión a los 7 días para verificar su resistencia.

Las pruebas, consisten en la confección de briquetas con el material granular reciclado compactado en moldes metálicos, cuyo volumen se puede determinar. En los moldes, se añade el material reciclado con la respectiva humedad óptima, mezclado con las cantidades de cemento de acuerdo a distintos porcentajes para ensayar. La cantidad de cemento para cada muestra es el producto del porcentaje elegido, por su peso, el cual se obtiene mediante el producto del volumen de la muestra por su densidad máxima seca.

Las muestras se ensayarán a compresión a los 7 días, para determinar el porcentaje de cemento óptimo, para el que la resistencia sea mayor a 25 y menor a 42 kg/cm². El procedimiento de ensayo deberá ser consultado en la normativa ASTM para estos efectos.

La figura 14 muestra la evolución típica de la resistencia con la edad de curado, para dos tipos de suelo – cemento, con porcentajes de cemento en peso del 10% y 3%.

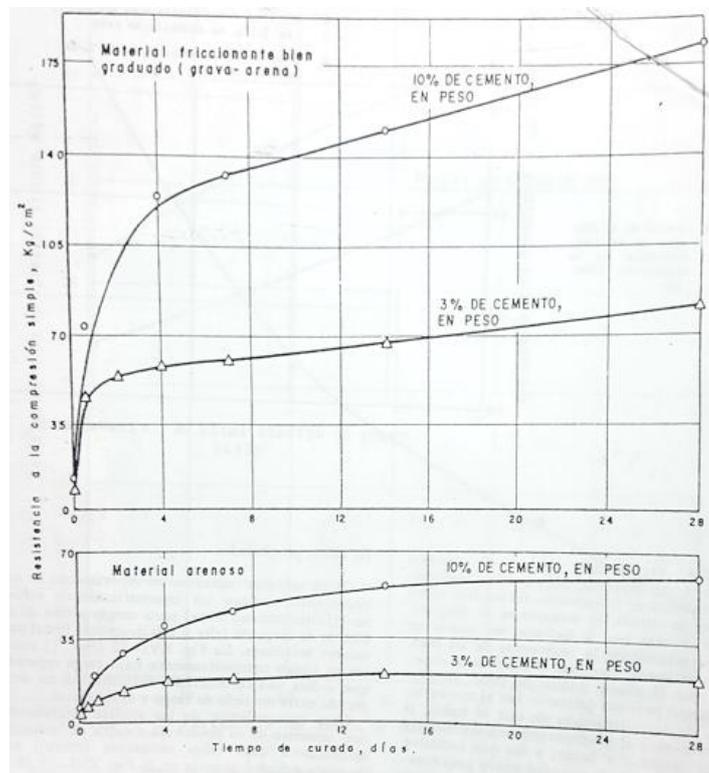


Figura 14.

Las experiencias de estos estudios indican que para suelo grava – arena con 3% de cemento, en 7 días la resistencia a compresión puede llegar a los 52 kg/cm², siendo en este período donde se da la mayor tasa de incremento, la cual es constante para edades mayores a los 7 días. Para suelos arenosos, con 3% de cemento, en 7 días la resistencia puede llegar hasta 18 kg/cm², la cual se mantiene para edades mayores. Desde luego, las curvas de resistencia frente a la edad varían, de acuerdo con el tipo de suelo y del cemento que se incorpore en el mezclado

10. RUBROS Y CANTIDADES DE OBRA.

Los rubros requeridos para la rehabilitación del pavimento se detallan en la tabla 35 con las respectivas cantidades de obra.

Se incluyen rubros para obras de drenaje (alcantarillado pluvial y sanitario), por posibles afectaciones a estas infraestructuras durante el proceso constructivo.

Los rubros y cantidades se detallan para cada tramo en consideración: 2+700 – 8+420, y 8+420 – 22+297,47. Para los rubros de transporte se consideraron las escombreras y fuentes de materiales más cercanas al proyecto.

Tabla 35. Tabla de rubros y cantidades de obra.

TABLA DE RUBROS Y CANTIDADES DE OBRA: REHABILITACIÓN AV. OSWALDO GUAYASAMÍN (INTEROCEÁNICA) TRAMO: km 2+700 – 8+420

Código	Descripción	UNIDAD	CANTIDAD	OBSERVACIONES
1 OBRAS DE DRENAJE				
V933	Construcción de sumidero. No incluye cerco, rejilla ni cadena. 609-(2)S	u	10,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
V945	Cerco y rejilla de hierro para sumidero. Nuevos, abisagrados. 609-(5)S	u	10,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
0934	Pozo de revisión H.S. 180 kg/cm ² , D=1m E = 0,25m Encofrado metálico, estribo cada 0.35 m d= 16mm. Sin tapa ni cerco, incluye armadura.	m	12,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
V935	Cerco y tapa de hierro pozo de revisión. 609-(5)	u	20,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
P670	Tubería PVC alcantarillado 220 mm x 6 m (Di=200mm)	m	20,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
0012	Excavación con retroexcavadora (h de 0 a 2m). Incluye desalojo con volqueta	m ³	48,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
0020	Relleno compactado con suelo préstamo INC. 5 km TRANSP. Suelo selecto, libre de materia orgánica, escombros. Vibroapisonador	m ³	48,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
0744	Colchón de arena fina	m ³	2,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
V936	Refacción de pozo de acceso o sumidero. Bajada o subida de pozo o sumidero. 609-(6)	u	20,00	* Cantidades estimadas: Posibles ajustes en proyecto vertical.
1063	Limpieza de sumidero y tubería. Incluye desalojo	u	24,00	* Mantenimiento de obras de drenaje
2 PAVIMENTO				
4534	Fresado de carpeta asfáltica. No incluye transporte	m ³	16.893,00	Espesor 18 cm- Dato determinado en el diseño de pavimentos
V210	Transporte de material fresado. Hasta sitios indicados por Fiscalización. Está en este rubro incluido el esponjamiento. 309-6(2)	m ³ .km	50.004,00	Distancia estimada 2.96 Km hasta la planta de asfalto EPMMOP
404-2(1b)	Reciclado de capa granular 1 existente, estabilizado con cemento hidráulico de moderado calor de hidratación norma NTE INEN 2380 (aprox 3,5% al peso), en sitio (No incluye cemento).	m ³	14.077,00	Dato determinado en el diseño de pavimentos
404-2(2)	Suministro y distribución de cemento hidráulico de moderado calor de hidratación norma NTE INEN 2380	ton	887,00	Diseño considera estabilizar el reciclado con cemento.
V917	Imprimación con asfalto diluido RC-250. No incluye arena de secado. 405-1(1)	l	93.849,00	Rata 1,0 lt/m ² . Se adopta la mínima especificada, dado que se trata de otorgar curado a la base cemento.
V909	Asfalto diluido RC-250 para riego adherencia 405-2(1) De 0,15 a 0,45 lt/m ²	l	84.464,00	Rata 0.45 lt/m ²
V523	Carpeta asfáltica en caliente e=15 cm. Inc. Transporte de mezcla a la obra. Mezclado en planta, tendido, conformación y compactación. Incluye transporte de la mezcla de la planta a la obra. 405-5.	m ²	93.849,00	Dato determinado en el diseño de pavimentos
3 SEÑALIZACIÓN HORIZONTAL				
2908	Señalización horizontal con material termoplástico: limpieza de superficie, aplicación con máquina y microesferas. Líneas, figuras, nombres y otros	m ²	7.433,00	Valor estimativo, deberá ser verificado con diseño de GOM



4 RUBROS AMBIENTALES				
V001	Charlas de concientización 220-(1)	u	1,00	
V011	Agua para control de polvo con camión cisterna	m3	1.033,00	Rata estimada= 2,2lt por m2 (Especificación MOP), para 5 pasadas de tanquero.
V007	Letrero ambiental de proyecto (0,6 x 1,20) h=2 m. Instalado. 711 iF	u	2,00	
V014	Publicación por prensa 8,4 x 10,9 cm. 220-(6) A	u	1,00	
1162	ROTULO LONA 13 ONZAS DESCR. OBRA 2.40x1.20m (2 PARANTES) 2 DADOS DE H.S. Marco tubo cuad. 1 1/4" x 2mm, parante tubo cuad. galv. 50x50x2mm, anticorrosivo 2 manos, gigantografía lona 13 onzas. Instalado en 2 dados de H.S.210kg/cm2 de 40x40x40cm	u	2,00	

TABLA DE RUBROS Y CANTIDADES DE OBRA: REHABILITACIÓN AV. OSWALDO GUAYASAMÍN (INTEROCEÁNICA) TRAMO: km8+420 – 22+297,47

Código	Descripción	UNIDAD	CANTIDAD	OBSERVACIONES
1 MOVIMIENTO DE TIERRAS				
V321	Excavación sin clasificar. Incluye conformación, compactación de subrasante y transporte de tierra 500 m. 303-2(1)	m3	6.888,00	* Retiro de mterial granular inadecuado.
V206	Transporte de material de excavación. Incluye esponjamiento y pago en escombrera. 309-2(2)	m3.km	182.532,00	* Desalojo del material granular inadecuado hacia escombrera más cercana al Proyecto.
2 PAVIMENTO				
4534	Fresado de carpeta asfáltica. No incluye transporte	m3	49.797,00	Espesor 20 cm- Dato determinado en el diseño de pavimentos
V210	Transporte de material fresado. Hasta sitios indicados por Fiscalización. Está en este rubro incluido el esponjamiento. 309-6(2)	m3.km	635.347,00	Distancia estimada 12.76 Km hasta la planta de asfalto EPMMOP
404-2(1b)	Reciclado de capa granular 1 existente , estabilizado con cemento hidráulico de moderado calor de hidratación norma NTE INEN 2380 (aprox 3,5% al peso), en sitio. (No incluye cemento).	m3	37.348,00	Dato determinado en el diseño de pavimentos
404-2(2)	Suministro y distribución de cemento hidráulico de moderado calor de hidratación norma NTE INEN 2380	ton	2.353,00	Diseño considera estabilizar el reciclado con cemento.
V915	Sub-base clase 3 - Sin transporte. Incluye tendido y compactación. 403-1(E)	m3	4.305,00	* Reemplazo de material granular inadecuado. Espesor 25 cm
V800	Base clase 2- sin transporte. Incluye tendido y compactación. 404-1(E)	m3	2.583,00	* Material de base nueva, en tramos de material inadecuado. Mezclar con cemento. Soporte de capa asfáltica. Espesor 15 cm
V207	Transporte de subbase, base, material de mejoramiento. Transporte de la mina a la obra. Incluye esponjamiento. 309-4(2)	m3.km	289.296,00	* Transporte desde mina más cercana hacia el tramo de reemplazo de granulares. Espesor
V917	Imprimación con asfalto diluido RC-250. No incluye arena de secado. 405-1(1)	/	248.985,00	Rata 1,0 lt/m2. Se adopta la mínima especificada, dado que se trata de otorgar curado a la base cemento.
V909	Asfalto diluido RC-250 para riego adherencia 405-2(1) De 0,15 a 0,45 lt/m2	/	224.086,00	Rata 0.45 lt/m2
2524	Carpeta asfáltica en caliente e=17,5 cm. Inc. Transporte de mezcla a la obra. Mezclado en planta, tendido, conformación y compactación. Incluye transporte de la mezcla a la obra. 405-5.	m2	248.984,44	Dato determinado en el diseño de pavimentos
3 OBRAS DE DRENAJE				
V933	Construcción de sumidero. No incluye cerco, rejilla ni cadena. 609-(2)S	u	30,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
V945	Cerco y rejilla de hierro para sumidero. Nuevos,abisagrados. 609-(5)S	u	30,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
0934	Pozo de revisión H.S. 180 kg/cm2, D=1m E = 0,25m Encofrado metálico, estribo cada 0.35 m d= 16mm. Sin tapa ni cerco, incluye armadura.	m	12,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
V935	Cerco y tapa de hierro pozo de revisión. 609-(5)	u	4,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
P670	Tubería PVC alcantarillado 220 mm x 6 m (Di=200mm)	m	20,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
0012	Excavación con retroexcavadora (h de 0 a 2m). Incluye desalojo con volqueta	m3	48,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
0020	Relleno compactado con suelo préstamo INC. 5 km TRANSP. Suelo selecto, libre de materia orgánica, escombros. Vibroapisonador	m3	48,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
0744	Colchón de arena fina	m3	2,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
0929	Bordillo hº simple, f c 180 kg/cm2: h=0,50m, bM=0,20m, bm=0,15 m. Incluye encofrado, excavación y desalojo. 610(1) A	m	500,00	* Cantidades estimadas: Posibles daños, afectaciones por reciclado
V936	Refacción de pozo de acceso o sumidero. Bajada o subida de pozo o sumidero. 609-(6)	u	180,00	* Cantidades estimadas: Posibles ajustes en proyecto vertical.
1063	Limpieza de sumidero y tubería. Incluye desalojo	u	136,00	* Mantenimiento de obras de drenaje

4 SEÑALIZACIÓN HORIZONTAL				
2908	Señalización horizontal con material termoplástico: limpieza de superficie, aplicación con máquina y microesferas. Líneas, figuras, nombres y otros	m2	17.748,00	Valor estimado, deberá ser verificado con diseño de GOM
5 RUBROS AMBIENTALES				
V001	Charlas de concientización 220-(1)	u	1,00	
V011	Agua para control de polvo con camión cisterna	m3	2.739,00	Rata estimada= 2,2lt por m2 (Especificación MOP), para 5 pasadas de tanquero.
V007	Letrero ambiental de proyecto (0,6 x 1,20) h=2 m. Instalado. 711 iF	u	2,00	
V014	Publicación por prensa 8,4 x 10,9 cm. 220-(6) A	u	1,00	
1162	ROTULO LONA 13 ONZAS DESCR. OBRA 2.40x1.20m (2 PARANTES) 2 DADOS DE H.S. Marco tubo cuad. 1 1/4" x 2mm, parante tubo cuad. galv. 50x50x2mm, anticorrosivo 2 manos, gigantografía lona 13 onzas. Instalado en 2 dados de H.S.210kg/cm2 de 40x40x40cm	u	2,00	

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

11.1 CONCLUSIONES.

1. Para la rehabilitación de la Av. Oswaldo Guayasamín, fue necesario establecer dos tramos de intervención: 2+700(a 10 m del peaje Guayasamín) – 8+420 (Intercambiador Paseo San Francisco): zona no consolidada, sistema de drenaje conformado por cunetas laterales, y 8+420 – 22+297,47(ingreso a Pifo): zona consolidada que se desarrolla entre las poblaciones de Cumbayá, Tumbaco y Puenbo: bordillos y aceras. Los espesores de diseño de pavimento se calcularon con el fin de cumplir con el número estructural requerido y de no modificar sustancialmente el proyecto vertical conservando en lo posible, niveles originales de calzada.

2. La rehabilitación consiste en:

- Fresado y desalojo de la totalidad de la carpeta existente, hacia la Planta de Asfalto de la EPMMOP, ubicada en el km 2+600 del proyecto. Los espesores de fresado varían para cada tramo: 2+700 – 8+420, espesor promedio de 18 cm, y 8+420 – 22+297,47 espesor de 20 cm (reporte de espesores de núcleos de asfalto, tabla 24)
- Reciclado del material granular existente, y estabilización con cemento hidráulico de moderado calor de hidratación, **adoptándose espesor de 15 cm** para reciclado de material granular existente, que es el máximo espesor admitido por las especificaciones técnicas (MOP, 2002), y es el mínimo recomendado por el Instituto del Asfalto.
- Colocar capa de rodadura de carpeta asfáltica. **Espesor de 15 cm** en el tramo 2+700 – 8+420, y **espesor de 17,5 cm** en el tramo 8+420 – 22+297,47.

3. **Se optó por fresar y desalojar la totalidad de la carpeta existente**, dado que los módulos en tres sitios de extracción resultaron muy elevados, indicativo de carpeta muy rígida, y propensa a fisuración. Las fisuras observadas en las paredes de los núcleos de asfalto tienen profundidades diversas, pero cabe resaltar, fisuras de profundidad: 15 cm km 7+700 calzada izquierda, 12 cm km 8+700 calzada izquierda, 10 cm km 14+000, calzada derecha, 8 cm km 20+200 calzada derecha. Estas observaciones son de importancia, pues permiten concluir que no es viable la solución de colocar sobre carpeta.

4. De acuerdo con los ensayos correspondientes de laboratorio presentados (Anexo 6), y los módulos elásticos del material granular existente (gráfico 29 y 30), este cumple con los requerimientos que exigen las Especificaciones técnicas (MOP, 2002) para su uso como subbase clase 3.

5. Los módulos de elasticidad de la subrasante se calcularon mediante aplicación del modelo de Hogg, tomando como datos de entrada las deflexiones medidas mediante el ensayo con Viga Bénkelman. Los módulos de elasticidad del material granular se calcularon mediante la ecuación generalizada de Palmer y Barber. De manera general, los resultados indican: el 60% del pavimento requiere refuerzo y en el 74% del tramo existe carencia estructural. En este sentido, en lugar de aumentar el espesor granular, se optó por aprovechar el material granular existente (15 cm), y estabilizarlo con cemento, para solventar la falta de capacidad estructural del pavimento, como indican los resultados del análisis. El reciclado de los materiales es una

solución viable, pues se evita la explotación de agregados en fuentes que se encuentran muy alejadas del sitio del proyecto, reduciendo los costos en la construcción, y afectaciones al medio ambiente.

6. Con referencia al Índice de Condición actual: Es necesario estabilizar el material granular con cemento, dado que los resultados de evaluación funcional mediante el índice PCI, indican: falla más frecuente: grietas longitudinales y transversales en la carpeta a existente, siendo una de sus causas, la presencia de grietas en el material granular, que han reflejado en la carpeta. Del estudio deflectométrico, varios puntos presentaron deflexiones mayores a la característica, y un número significativo de puntos presentaron radios de curvatura menores a 100 m (gráfico 15), que indica: estructura actual sometida a elevadas tensiones de tracción por la flexión de las capas del pavimento. Una base estabilizada con cemento permite absorber estas tensiones de una manera más eficaz, con un controlado porcentaje de cemento, para evitar el exceso de rigidez.

7. Fórmula maestra de obra: Debe contener lo siguiente:

- Proctor del material granular reciclado, humedad óptima de compactación.
- Porcentaje óptimo de cemento a añadir, en peso del material granular reciclado.
- La granulometría del reciclado deberá ser controlada en la ejecución de la obra, a fin de realizar los ajustes necesarios a la fórmula maestra de obra inicialmente establecida.

8. De acuerdo con los resultados de ensayos de laboratorio, el material granular existente se clasifica mediante el sistema AASHTO como suelo tipo A1-a; A1-b, apto para uso como material de subbase clase 3, y aptos para ser estabilizados con cemento. Están constituidos por fragmentos de piedra, grava y arena, suelos buenos para terreno de fundación. Los porcentajes de desgaste son menores a los que establecen las normas del MTOP. En cuanto a granulometría: Las curvas granulométricas del material granular, en dos muestras ensayadas, resultaron muy cercanas a la curva de límites de la faja especificada por el MTOP, por lo que es probable que deban adicionarse materiales, a fin de centrar la curva en la faja granulométrica. Esto, deberá ser controlado durante el proceso constructivo. La curva granulométrica del material reciclado, deberá ajustarse a las fajas establecidas para material de base clase 2, conforme las especificaciones (MOP, 2002).

9. Para material de subrasante, se obtuvieron índices de plasticidad menores al 9%, establecido en la norma MTOP. Clasificación AASHTO A-2-4, gravas y arenas limo arcillosas, y A-4: suelos limosos. Excelente a bueno como terreno de fundación, pero muy susceptibles de perder capacidad portante por aumento de la humedad. Al respecto, la humedad natural de estos suelos es elevada (16,8 al 24,46%).

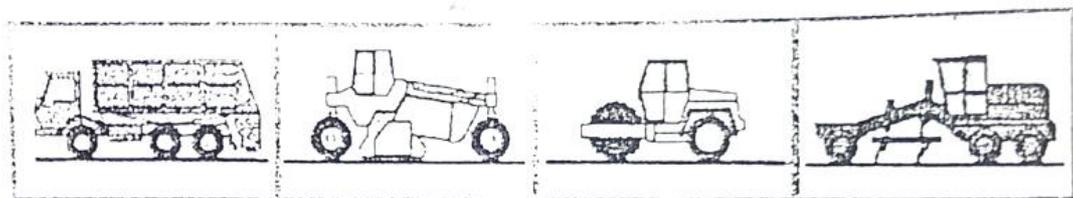
10. Los valores de CBR de campo para la subrasante, guardan similitud con los calculados mediante el modelo de Hogg. Cabe señalar que, si se hubiera optado por estos valores de campo, al analizar los CBR del acápite 7.2.1 para el percentil 87,5%, se habría obtenido CBR de diseño del 2,5% para todo el tramo, lo que habría dado como resultado mayores espesores de capas granulares y de carpeta asfáltica. El modelo de Hogg proporcionó un mayor rango de valores, que permitieron calcular por tramificación, menores espesores necesarios, favoreciendo la reducción de costos.

11. Dentro de los resultados obtenidos mediante el modelo de Hogg, se puede establecer el perfil estratigráfico del estrato rocoso, mediante los valores de H calculados, que indican la profundidad de la capa rígida bajo la subrasante. Trabajos de geofísica o perforaciones pueden servir para corroborar las profundidades del estrato rígido obtenidas mediante el modelo de Hogg.

11.2 RECOMENDACIONES.

1. Es necesario que previo el inicio de los trabajos, se realicen los ensayos para determinar el porcentaje óptimo de cemento a añadir en el reciclado, y obtener la fórmula maestra de obra definitiva. De manera general, se recomienda incorporar como máximo el 3,5% de cemento, en peso del material reciclado, a fin de obtener resistencias de 40 kg/cm², a los 7 días de curado.

2. Las resistencias a la compresión varían de acuerdo con el tipo de cemento incorporado y con el tipo de suelo. Por tal motivo, es recomendable, previa la construcción, realizar los ensayos correspondientes, y obtener las curvas de resistencia para el *cemento hidráulico de moderado calor de hidratación* a ser incorporado. A los 7 días, las resistencias deben ser mayores a 25kg/cm², y menores a 40kg/cm².
3. Se recomienda realizar pruebas para ajustar la apertura de la compuerta del rotor, a fin de obtener gradaciones que se ajusten a la faja especificada para base clase 2. Durante el reciclado, el material se tritura por el impacto con la compuerta del rotor. Si la apertura es muy pequeña se obtienen gradaciones finas, y para aperturas grandes, las gradaciones resultan gruesas.
4. Luego de realizada la distribución del cemento, la conformación, hidratación y compactación debe realizarse en un tiempo máximo de 4 horas.
5. Si el ancho del tramo a intervenir es variable, se recomienda realizar por lo menos cinco mediciones, o las que indique el Fiscalizador, a fin de calcular el ancho promedio y calcular el peso requerido de cemento. En todo caso, en obra debe decidirse el método apropiado para calcular el área en cada intervención. En caso de que el tramo presente variaciones bruscas, es necesario calcular el área mediante levantamiento topográfico.
6. Al terminar los trabajos, la base reciclada con cemento debe protegerse contra el secado prematuro, mediante la aplicación de riego de asfalto diluido RC-250, con una rata mínima de 1 lt /m². Este proceso ayudará a evitar el agrietamiento de la base por el secado prematuro. Se recomienda imprimir la base con la superficie húmeda y que esté libre de impurezas.
7. Se deben realizar los trabajos en la secuencia que se indica a continuación:

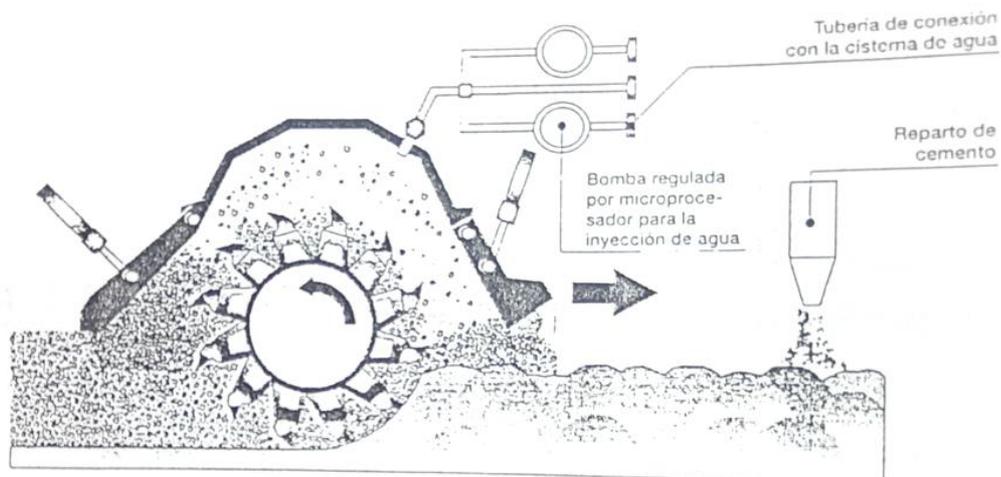


DOSIFICACION
DE CEMENTO

INCORPORACION DE
AGUA Y MEZCLADO

COMPACTACION

NIVELACION



Para la hidratación de la mezcla, el tanquero de agua se debe conectar a la recicladora y el agua es incorporada a la mezcla por inyección a través de las puntas del rotor. La cantidad de agua debe controlarse desde la recicladora, y no deberá exceder la humedad óptima para la compactación, con base en el ensayo Proctor.

Referencias

- AASHTO. (1993). *Design Of Pavement Structures*. Washington.
- Castellanos, Juan. (s.f.). Mecánica de Pavimentos. *Construcción y Diseño de Pavimentos*. Fundación Universitaria.
- Hoffman, Del Aguila. (1985). ESTUDIOS DE EVALUACIÓN ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS BASADOS EN LA INTERPRETACIÓN DE CURVAS DE DEFLEXIONES. *Academia.edu*.
Obtenido de <https://www.academia.edu>
- INEC. (2024). *Estadísticas de Transporte ESTRA*. Obtenido de www.inec.gob.ec.
- INEC. (2024). *www.inec.gob.ec*. Obtenido de Estadísticas de Población.
- INEC. (2024). *www.inec.gob.ec*. Obtenido de Estadísticas de Transporte ESTRA.
- INVIAS. (1998). *Manual de diseño de pavimentos asfálticos con medios y altos volúmenes de tránsito*. Popayán, Colombia: Ministerio del Transporte.
- Montejo, A. (2002). *Ingeniería de Pavimentos para Carreteras*. Bogotá: Valbuena.
- MOP. (2002). *ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE CAMINOS Y PUENTES MOP-001F-2002*.
- MTOP. (2013). *NORMA ECUATORIANA VIAL NEVI-12*. Quito, Ecuador.
- O. Agnusdei, A. Iosco, D. Osio, B. Rego, Gutiérrez Pablo. (Agosto, 2002). *LEMAR*.
Investigaciones Viales. La Plata, Argentina: Universidad Tecnológica Nacional.
Facultad Regional La Plata.
- R.N. Stubstad, Y.J. Jiang, M.L. Clevenson, and E.O. (Febrero, 2006). Review of the Long-Term Pavement Performance Backcalculation Results. *Federal Highway Administration*.
- Standard Practice for Roads and Parking Lots Pavement Condition Index Surveys. ASTM D6433-18. (s.f.). *ASTM D6433-18*.

Atentamente,

Ing. Patricio Ochoa Cañizares.
SUPERVISOR EJECUTOR DE PROCESOS 2.