

METODOLOGÍA PARA OBTENER EL FACTOR “ESAL” DE DISEÑO PARA PAVIMENTOS.

C. Alexis Giovanni
Ramos Luna

C. M.I. Jesús
Agüero López

C. M.C. Gaudencio
Vicente López
Mendoza

C. M.C. Ramiro
Ruiz Silva

Tierra Colorada, Gro.
01 (745) 113 6026
Código postal 39940

Chilpancingo, Gro.
01 (747) 472 7943
Código postal 39000

Chilpancingo, Gro.
01 (747) 472 7943
Código postal 39000

Chilpancingo, Gro.
01 (747) 472 7943
Código postal 39000

alexisramosluna@
gmail.com

ingenieria@uagro.m
x

ingenieria@uagro.mx

ingenieria@uagro.
mx

RESUMEN

Para el análisis y obtención del ESAL de diseño la Carretera Federal Chilpancingo – Acapulco en los tramos de estudio del Km. 50+680 El Ocotito y Km. 61+180 Tierra Colorada, a cargo de la Secretaría de Comunicaciones y Transporte del Centro S.C.T. Guerrero se llevó a cabo la investigación de los aforos más actualizados que existen en los mismos así como las visitas correspondientes al sitio de estudio.

Para diseñar un pavimento flexible por la metodología de la AASTHO (American Association of State Highway and Transportation Officials), del Instituto del Asfalto de los Estados Unidos de América y del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México; se requiere de un parámetro denominado ESAL de diseño, basándose en las cargas esperadas y acumulativas de un eje equivalente a 18,000 libras durante el periodo de análisis; utilizando los valores dados en el manual de Datos Viales 2018 para los tramos carreteros que se analizaron, se obtuvieron los valores requerido para sus diseños.

Palabras reservadas

Análisis, Diseño, Proyecto, Pavimentos.

INTRODUCCIÓN

El análisis del tráfico en la vialidad que se está realizando su estudio del diseño estructural del pavimento flexible, es muy importante su consideración ya que con ello, se obtiene el parámetro del ESAL de diseño que es simplemente el valor del total de los ejes equivalentes que circulan en la zona y que provocan un daño estructural a las capas de apoyo.

Mediante el peso que ejercen los ejes de los vehículos que circulan sobre la superficie de rodamiento, se puede determinar el valor de ESAL de diseño, llevando un análisis de factor de equivalencia de carga en función del peso de cada eje, considerando también el porcentaje de cada uno de los diferentes tipos de vehículos que transitan; un valor de distribución direccional de acuerdo al tipo de la vialidad y una tasa de

crecimiento del tráfico propuesta por el especialista en el diseño del pavimento.

Consideremos que la temática que se presenta en este trabajo, es de suma importancia para poder tener una perspectiva del diseño del pavimento flexible, considerando cada uno de los puntos que se explicaran a detalle, para comprender mejor la metodología de su diseño estructural.

CAPÍTULO 1 DEFINICIONES

1.1.- DEFINICIÓN DEL PROBLEMA. Cuando no se tienen datos del tráfico para las regiones del Estado de Guerrero, es muy complicado hacer una suposición del Tránsito Diario Promedio Anual, y por ello determinar el ESAL de diseño, para nuestra proposición de la estructura del pavimento flexible.

1.2.- DEFINICIÓN DEL OBJETIVO GENERAL. Obtener el ESAL de diseño del tramo en estudio mediante el uso y aplicación de datos viales adquiridos en la región del estudio del Estado de Guerrero, así como los pesos que ejercen los vehículos que transitan sobre la superficie de rodamiento para poder determinar el análisis de la estructura del pavimento flexible.

1.3.- DEFINICIÓN DE OBJETIVOS ESPECÍFICOS. Realizar el análisis del tráfico de las regiones de los tramos carreteros del Estado de Guerrero en la zona particularmente elegidas para su estudio, para poder obtener el valor del ESAL de diseño para determinar el diseño estructural del pavimento flexible.

1.4.- EL CONCEPTO DEL ESAL DE DISEÑO. El ESAL de Diseño es el Número de Repeticiones de Carga Equivalente de un Eje Simple de Ruedas Duales de Carga Standard de 18,000 lb (8.2 Ton.) acumulado en el período de diseño considerado en el carril de diseño.

CAPÍTULO 2 EL FACTOR ESAL DE DISEÑO

2.1.- EL PERIODO DE DISEÑO. Un pavimento debe ser diseñado para soportar los efectos acumulados del tránsito para cualquier período de tiempo; el período seleccionado, en años, se define como “Período de Diseño”. Al término de éste, se espera

que el pavimento requiera alguna acción de rehabilitación mayor, como puede ser una sobrecarpeta de refuerzo para restaurar su condición original. La vida útil del pavimento, o “Período de Análisis”, puede ser extendida indefinidamente, a través de sobrecarpetas u otras acciones de rehabilitación, hasta que la carretera sea obsoleta por cambios significativos en pendientes, alineamiento geométrico y otros factores. En la versión reciente, el método considera períodos de diseño de uno a 35 años y tasas de crecimiento del tránsito del 2 al 10% anual. (Ver Tabla 2.1.).

TABLA 2.1. Tasa anual de crecimiento del tránsito.

Período de Diseño, años (n)	Tasa Anual de Crecimiento, en por ciento.						
	2	4	5	6	7	8	10
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
2	2.02	2.04	2.05	2.06	2.07	2.08	2.10
3	3.06	3.12	3.15	3.18	3.21	3.25	3.31
4	4.12	4.25	4.31	4.37	4.44	4.51	4.64
5	5.20	5.42	5.53	5.64	5.75	5.87	6.11
6	6.31	6.03	6.80	6.98	7.15	7.34	7.72
7	7.43	7.90	8.14	8.39	8.65	8.92	9.49
8	8.58	9.21	9.55	9.90	10.26	10.64	11.44
9	9.75	10.58	11.03	11.49	11.98	12.49	13.58
10	10.95	12.01	12.58	13.18	13.82	14.49	15.94
11	12.17	13.49	14.21	14.97	15.78	16.65	18.53
12	13.41	15.03	15.92	16.87	17.89	18.98	21.38
13	14.68	16.03	17.71	18.88	20.14	21.50	24.52
14	15.97	18.29	19.16	21.01	22.55	24.21	27.97
15	17.29	20.02	21.58	23.28	25.13	27.15	31.77
16	18.64	21.82	23.66	25.67	27.89	30.32	35.95
17	20.01	23.70	25.84	28.21	30.84	33.75	40.55
18	21.41	25.65	28.13	30.91	34.00	37.45	45.60
19	22.84	27.67	30.54	33.76	37.39	41.45	51.16
20	24.30	29.78	33.06	36.79	41.00	45.76	57.28
25	32.03	41.65	47.73	54.86	63.25	73.11	98.35
30	40.57	56.08	66.44	79.06	94.46	113.28	164.49
35	49.99	73.65	90.32	111.43	138.24	172.32	271.02

En los métodos AASHTO de 1961 y de 1972 era frecuente diseñar los pavimentos para un período máximo de 20 años; hoy en día, en el Método AASHTO 1993, se recomienda que se estudien los pavimentos para un período de comportamiento mayor (Ver Tabla 2.2.), ya que ellos pueden dar lugar a una mejor evaluación de las alternativas a largo plazo basadas en análisis de costo-tiempo. En cualquier caso, sin embargo, se recomienda que el período de análisis incluya al menos una rehabilitación de la estructura recomendada.

TABLA 2.2. Períodos de diseño en función del tipo de carretera.

TIPO DE CARRETERA	PERÍODO DE ANÁLISIS	PERÍODO DE DISEÑO
Urbana con altos volúmenes de tránsito	30 – 50 (años)	15 – 20 (30) (años)
Interurbana con altos volúmenes de tránsito	20 – 50 (años)	15 – 20 (30) (años)
Pavimentada con bajos volúmenes de tránsito	15 – 25 (años)	5 – 12 (años)
Revestidas con bajos volúmenes de tránsito	10 – 20 (años)	5 – 8 (años)

2.2.- TRÁNSITO. Para el cálculo del tránsito, el método actual que se aplica, contempla los ejes equivalentes sencillos de 18,000 lb (8.2 ton) acumulados durante el período de diseño.

Se recomienda que para fines de diseño en “etapas o fases” se dibuje una gráfica donde se muestre año con año, el crecimiento de los ejes acumulados (ESAL) vs tiempo, en años, hasta llegar al fin del período de diseño o primera vida útil del pavimento. La ecuación siguiente puede ser usada para calcular el parámetro del tránsito (ESAL) en el carril de diseño.

$$ESAL = ESAL_a * D_D * D_L \quad \text{Ecuación.....(2.1)}$$

Donde:

ESAL = Tránsito acumulado en el primer año, en ejes equivalentes sencillos de 8.2 ton, en el carril de diseño.

ESAL_a = Ejes acumulados en el período de diseño considerado el tráfico en ambos sentidos de circulación.

D_D = Factor de distribución direccional; se recomienda 0.5 para la mayoría de las carreteras, pudiendo variar de 0.3 a 0.7, dependiendo de en qué dirección va el tránsito con mayor porcentaje de vehículos pesados.

D_L = Factor de distribución por carril, cuando se tengan dos o más carriles por sentido, se recomiendan los siguientes valores:

TABLA 2.3. Factor de distribución por carril.

Número de carriles en cada sentido	% de ESAL en el carril de diseño
1	100
2	80 – 100
3	60 – 80
4 o más	50 – 75

Habiéndose obtenido los coeficientes por cada eje o conjunto de ejes, la suma proporcionará el coeficiente total de equivalencia del vehículo. Utilizando el factor o tasa anual de crecimiento del tránsito señalado en la Tabla 2.1., y multiplicándolo por los coeficientes totales de equivalencia y por el número de vehículos del aforo del tránsito promedio anual, se obtienen los ejes equivalentes acumulados reales para el período de diseño considerado. Otra forma para poder para calcular el ESAL en el carril de diseño es con la ecuación siguiente:

$$ESAL = N * F_E * TDPA * 365 * fd * Tc \quad \text{Ecuación... (2.2)}$$

Donde:

ESAL = Ejes acumulados en el período de diseño considerado el tráfico en el carril de diseño.

N = Número de ejes del vehículo analizado.

F_E = Factor de equivalencia de carga.

TDPA = Tránsito diario promedio anual correspondiente al porcentaje de la composición del vehículo analizado.

fd = Porcentaje de camiones en el flujo vehicular sobre el carril de diseño.

Tc = Tasa anual del crecimiento del tránsito.

Para el cálculo del porcentaje de camiones en el flujo vehicular sobre el carril de diseño (*fd*), el método actual del Instituto del Asfalto (EUA) recomienda los siguientes valores:

TABLA 2.4. Porcentaje de camiones en el carril de diseño.

Número de carriles en ambas direcciones	% de camiones en el carril de diseño
2	50
4	45
6 ó más	40

Un punto importante que se hace notar, es que para el cálculo de los ejes equivalentes, el método vigente del Instituto del Asfalto (EUA), recomienda utilizar la metodología de la AASHTO, en su versión 1993. Para lo anterior, el método proporciona en la Tabla 2.5., factores de equivalencia de la carga o coeficientes de daño para ejes sencillos, dobles o triples, incluyendo cargas sobre el eje desde 0.5 toneladas (1,000 lb) hasta 41 toneladas (90,000 lb), lo que se considera cubre sobradamente cualquier condición de peso de vehículos de carga en cualquier red de carreteras, desde rurales hasta grandes autopistas.

TABLA 2.5. Factores de equivalencia de carga.

Carga Total por Eje o Conjunto de Ejes.		Factores de Equivalencia de Carga.		
Kn	lb	Eje Sencillo	Ejes dobles	Ejes Triples
4.45	1,000	0.00002		
8.9	2,000	0.00018		
17.8	4,000	0.00209	0.0003	
26.7	6,000	0.01043	0.001	0.0003
35.6	8,000	0.0343	0.003	0.001
44.5	10,000	0.0877	0.007	0.002
53.4	12,000	0.189	0.014	0.003
62.3	14,000	0.360	0.027	0.006
71.2	16,000	0.623	0.047	0.011
80.0	18,000	1.000	0.077	0.017
89.0	20,000	1.51	0.121	0.027
97.9	22,000	2.18	0.180	0.040
106.8	24,000	3.03	0.260	0.057
115.6	26,000	4.09	0.364	0.080
124.5	28,000	5.39	0.495	0.109
133.4	30,000	6.97	0.658	0.145
142.3	32,000	8.88	0.857	0.191
151.2	34,000	11.18	1.095	0.246
160.1	36,000	13.93	1.38	0.313
169.0	38,000	17.20	1.70	0.393
178.0	40,000	21.08	2.08	0.487
187.0	42,000	25.64	2.51	0.597
195.7	44,000	31.00	3.00	0.723
204.5	46,000	37.24	3.55	0.868
213.5	48,000	44.50	4.17	1.033
222.4	50,000	52.88	4.86	1.22
231.3	52,000		5.63	1.43
240.2	54,000		6.47	1.66
249.0	56,000		7.41	1.91
258.0	58,000		8.45	2.20
267.0	60,000		9.59	2.51
275.8	62,000		10.84	2.85
284.5	64,000		12.22	3.22
293.5	66,000		13.73	3.62
302.5	68,000		15.38	4.05
311.5	70,000		17.19	4.52
320.0	72,000		19.16	5.03
329.0	74,000		21.32	5.57
338.0	76,000		23.66	6.15
347.0	78,000		26.22	6.78
356.0	80,000		29.00	7.45
364.7	82,000		32.00	8.2
373.6	84,000		35.30	8.9
382.5	86,000		38.80	9.8
391.4	88,000		42.60	10.6
400.3	90,000		46.80	11.6

Una vez calculados los ejes equivalentes acumulados en el primer año, el diseñador deberá estimar con base en la tasa de crecimiento anual y el período de diseño en años, el total de ejes equivalentes acumulados y así contar con un parámetro de entrada para la ecuación general o para el nomograma de diseño para estructuras de pavimentos flexibles.

CAPÍTULO 3 APLICACIÓN DEL FACTOR EN EL ANÁLISIS DE PAVIMENTOS

3.1.- CÁLCULOS PARA DETERMINAR EL ESAL DE DISEÑO. De acuerdo a la ubicación de los tramos en estudio, se tiene información del Tránsito Diario Promedio Anual (TDPA) del año 2018, de acuerdo con los Datos Viales 2018 que publica anualmente la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (S.C.T.). En la siguiente tabla se describe la composición vehicular de los tramos carreteros:

El Ocotito Km. 50+680	Año 2018	Tierra Colorada Km. 61+180	Año 2018
TDPA	7,395	TDPA	4,642
(M)	3.6%	(M)	4.5%
(A)	87.2%	(A)	83.1%
(B)	0.7%	(B)	1.6%
(C2)	4.2%	(C2)	5.3%
(C3)	1.5%	(C3)	2.3%
(T3S2)	1.8%	(T3S2)	1.8%
(T3S3)	0.8%	(T3S3)	1.0%
(T3S2R4)	0.1%	(T3S2R4)	0.2%
OTROS	0.1%	OTROS	0.2%

En función de nuestra composición vehicular, lo que tenemos que realizar primeramente es el análisis de las cargas que genera cada uno de los vehículos. Para poder determinar estas cargas se utilizó la **NOM-012-SCT-2-2017** que nos estipula pesos y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal de México. A continuación se muestran las cargas de cada uno de los vehículos analizados.

NOMENCLATURA	VEHÍCULO	PESO EN EJES
M: MOTOCICLETA		0.411T 920.64 LB
A: AUTOMÓVIL		1T 2,240 LB 1T 2,240 LB
B: AUTOBÚS (B2)	 	6.5 T 14,560 LB 12.5 T 28,000 LB
C2: CAMIÓN 2 EJES SENCILLOS		6.5 T 14,560 LB 12.5 T 28,000 LB
C3: CAMIÓN 3 EJES SENCILLOS		6.5 T 14,560 LB 21 T 47,040 LB

NOMENCLATURA	VEHÍCULO	PESO EN EJES
T3S2: TRACTO CAMIÓN (3 EJES) SEMIRREMOLQUE (2 EJES)		6.5 T 14,560 LB 21 T 47,040 LB

		19 T 42,560 LB
T3S3: TRACTO CAMIÓN (3 EJES) SEMIRREMOLQUE (3 EJES)		6.5 T 14,560 LB 21 T 47,040 LB 26.5 T 59,360 LB
T3S2R4: TRACTO CAMIÓN (3 EJES) SEMIRREMOLQUE (2 EJES) REMOLQUE (4 EJES)		6.5 T 14,560 LB 18 T 40,320 LB 17 T 38,080 LB 17 T 38,080 LB 17 T 38,080 LB
OTROS: VEHÍCULOS ESPECIALES ETROEXCAVADORA 420F		3.3 T 7,392 LB 7.7 T 17,248 LB

Para el análisis de motocicletas y otros; se determinó utilizar una de las motocicletas más pesadas que existen en el mercado nacional así como el vehículo especial que transita por esta zona que es una Retroexcavadora.

Determinados los pesos y configuraciones de los ejes de cada vehículo, se procede a obtener los factores de equivalencia de carga que se indican en la Tabla 2.5.

En nuestro caso, el tramo está clasificado como un A2, y se decidió proponer una tasa de crecimiento del 4% y un periodo de diseño de 20 años, así como el porcentaje de camiones en el carril de diseño de 50%.

Con los siguientes datos procedemos a realizar el análisis del ESAL de diseño utilizando la ecuación 2.2.

$$ESAL = N * F_E * TDPA * 365 * fd * T_c$$

Para el tramo carretero que comprende la zona del Ocotito Km. 50+680 se obtuvo lo siguiente:

EL OCOTITO	ESAL
(M)	28.94
(A)	28,681.90
(B)	1'638,393.82
(C2)	9'830,362.91
(C3)	2'595,942.44
(T3S2)	5'030,203.19
(T3S3)	2'159,637.18
(T3S2R4)	379,868.18
OTROS	35,580.04
ΣTOTAL	21'698,698.59

Una vez efectuado el análisis de cada vehículo, se procedió a realizar la sumatoria de los valores obtenidos dando como resultado un ***ESAL de diseño de 21'698,698.59*** ejes acumulados en el período de diseño considerado el tráfico en el carril de diseño; para el tramo carretero el Ocotito Km. 50+680, que corresponde a la región de nuestro punto de estudio de la carretera federal Chilpancingo – Acapulco. Ahora continuando con el análisis del ESAL de diseño utilizamos la ecuación 2.1. donde se presentan los siguientes cálculos:

$$ESAL = ESAL_a * D_D * D_L$$

Para el tramo carretero que comprende la zona del Ocotito Km. 50+680 se obtuvo lo siguiente:

EL OCOTITO	ESAL _a
(M)	1.94
(A)	1,926.25
(B)	110,033.16
(C2)	660,198.99
(C3)	174,341.33
(T3S2)	337,824.21
(T3S3)	145,039.41
(T3S2R4)	25,511.63
OTROS	2,389.53
ΣTOTAL	1'457,266.46

Efectuando la sumatoria de los resultados obtenidos para cada vehículo, el valor del ***ESAL_a*** fue de ***1'457,266.46***, el cual, se multiplicó por la *tasa de crecimiento* con un valor de ***29.78*** y por el *factor de distribución direccional* con un valor de ***0.5*** y por el *factor de distribución por carril* con un valor de ***0.9***; dándonos como resultado para el ***ESAL de diseño de 19'528,827.79*** ejes equivalentes acumulados reales para el período de diseño considerado; para el tramo carretero para el tramo carretero el Ocotito Km. 50+680, que corresponde a la región de nuestro punto de estudio de la carretera federal Chilpancingo – Acapulco.

Para el tramo carretero que comprende la zona de Tierra Colorada Km. 61+180, con sus datos correspondientes, procedemos a realizar el análisis del ESAL de diseño utilizando la ecuación 2.2.

$$ESAL = N * F_E * TDPA * 365 * fd * T_c$$

TIERRA COLORADA	ESAL
(M)	22.71
(A)	17,157.71
(B)	2'350,754.10
(C2)	7'786,872.94
(C3)	2'498,610.69
(T3S2)	3'157,566.35
(T3S3)	1'694,563.18
(T3S2R4)	476,902.79
OTROS	44,668.70
ΣTOTAL	18'027,119.18

Llevado a cabo el análisis de cada vehículo, se procedió a realizar la sumatoria de los valores obtenidos dando como resultado un ***ESAL de diseño de 18'027,119.18*** ejes acumulados en el período de diseño considerado el tráfico en el carril de diseño; para el tramo carretero de Tierra Colorada Km. 61+180, que corresponde a la segunda región de nuestro punto de estudio de la carretera federal Chilpancingo – Acapulco. Ahora continuando con el análisis del ESAL de diseño utilizamos la ecuación 2.1. donde se presentan los siguientes cálculos:

$$ESAL = ESAL_a * D_D * D_L$$

Para el tramo carretero que comprende la zona de Tierra Colorada Km. 61+180:

TIERRA COLORADA	ESAL _a
(M)	1.52
(A)	1,152.30
(B)	157,874.69
(C2)	522,959.90
(C3)	167,804.61
(T3S2)	212,059.50
(T3S3)	113,805.44
(T3S2R4)	32,028.39
OTROS	2,999.91
ΣTOTAL	1'210,686.26

Efectuando la sumatoria de los resultados obtenidos para cada vehículo, el valor del ***ESAL_a*** fue de ***1'210,686.26***, el cual, se multiplicó por la *tasa de crecimiento* con un valor de ***29.78*** y por el *factor de distribución direccional* con un valor de ***0.5*** y por el *factor de distribución por carril* con un valor de ***0.9***; dándonos como resultado para el ***ESAL de diseño de 16'224,406.62*** ejes equivalentes acumulados reales para el período de diseño considerado; para el tramo carretero de Tierra Colorada Km. 61+180, que corresponde a la segunda región de nuestro punto de estudio de la carretera federal Chilpancingo – Acapulco.

CONCLUSIONES

Para el tramo carretero del Ocotito, que corresponde a la región de nuestro punto de estudio ubicado en el Km. 50+680 de la carretera federal Chilpancingo – Acapulco, se obtuvo un ESAL de diseño de 21'698,698.59 ejes acumulados en el período de diseño considerado el tráfico en el carril de diseño, y de 19'528,827.79 ejes equivalentes acumulados reales para el

período de diseño considerado, con ambas ecuaciones alternativas para su análisis.

Para el tramo carretero de Tierra Colorada, que corresponde al otro punto de estudio ubicado en el Km. 61+180 de la carretera federal Chilpancingo – Acapulco obtuvimos un ESAL de diseño de 18'027,119.18 ejes acumulados en el período de diseño considerado el tráfico en el carril de diseño, y de 16'224,406.62 ejes acumulados en el período de diseño considerado el tráfico en el carril de diseño, con ambas ecuaciones alternativas para su análisis.

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce la colaboración del M.I. Jesús Agüero López docente investigador del programa educativo de Ingeniero Civil de la Facultad de Ingeniería por su participación como Director del Trabajo.

Se agradece la participación de los docentes M.C. Gaudencio Vicente López Mendoza y del M.C. Ramiro Ruiz Silva, ambos pertenecientes al programa educativo de Ingeniero Civil de la Facultad de Ingeniería, como parte de la revisión del presente trabajo de investigación.

REFERENCIAS

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials.- AASHTO Guide for Design of Pavement Structures.- American Association of State Highway and Transportation Officials.- Washington, D.C., USA, 1993.
- [2] Zarate, M..- Diseño de Pavimentos Flexibles, primera parte.- Asociación Mexicana del Asfalto A.C.- Ciudad de México, 2011.
- [3] Diario Oficial de la Federación.- PROYECTO de Norma Oficial Mexicana PROY-NOM-012-SCT-2-2017, Sobre el peso y dimensiones máximas con los que pueden circular los vehículos de autotransporte que transitan en las vías generales de comunicación de jurisdicción federal.- Ciudad de México, 2017.
- [4] Instituto Mexicano del Transporte.- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (S.C.T.).- Normativa para la Infraestructura del Transporte.- Querétaro, México, 2019.
- [5] Dirección General de Servicios Técnicos (D.G.S.T.).- Secretaría de Comunicaciones y Transportes (S.C.T.).- Datos Viales 2018.- Ciudad de México, 2018.