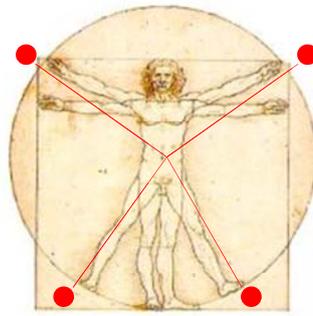


TECNOLOGÍ@ y *DESARROLLO*

Revista de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente

VOLUMEN XIII. AÑO 2015

SEPARATA



ESTUDIO DEL INCREMENTO DE LA DURABILIDAD DE LA SECCIÓN DEL FIRME DE LA CARRETERA VALLE YACUS. TRAMO: JAUJA - ATAURA. (PERÚ).

Esteban Ciria, Alberto, Colorado Aranguren, David, Couceiro Martínez, Luis



UNIVERSIDAD ALFONSO X EL SABIO
Escuela Politécnica Superior
Villanueva de la Cañada (Madrid)

© Del texto: Esteban Ciria, Alberto, Colorado Aranguren, David, Couceiro Martínez, Luis
Febrero, 2015.

<http://www.uax.es/publicacion/estudio-del-incremento-de-la-durabilidad-de-la-seccion-del-firme-de-la.pdf>

© De la edición: *Revista Tecnol@ y desarrollo*

Escuela Politécnica Superior.

Universidad Alfonso X el Sabio.

28691, Villanueva de la Cañada (Madrid).

ISSN: 1696-8085

Editor: Javier Morales Pérez – tecnologia@uax.es

No está permitida la reproducción total o parcial de este artículo, ni su almacenamiento o transmisión ya sea electrónico, químico, mecánico, por fotocopia u otros métodos, sin permiso previo por escrito de la revista.

ESTUDIO DEL INCREMENTO DE LA DURABILIDAD DE LA SECCIÓN DEL FIRME DE LA CARRETERA VALLE YACUS. TRAMO: JAUJA - ATAURA. (PERÚ).

Esteban Ciria, Alberto (a), Colorado Aranguren, David (b), Couceiro Martínez, Luis (c)

(a) Máster en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos.

Tlf: 975 222 904 e-mail: aestecir@myuax.com

(b) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos, Doctor por la Universidad Alfonso X el Sabio. Área de Matemáticas y Física Aplicadas

Tlf: 91 810 50 12, email: dcoloara@uax.es

(c) Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos. Doctor por la Universidad Alfonso X el Sabio
Coordinador del Grado en Ingeniería Civil

Tlf: 91 810 92 17 , email: lmartcou@uax.es

Universidad Alfonso X el Sabio. Avda. de la Universidad nº 1, Villanueva de la Cañada, 28691

RESUMEN: El presente trabajo aborda el estudio del diseño de la sección de la carretera convencional que une las poblaciones de Jauja y Ataura en la región de Junín (Perú). El objetivo principal es aumentar la vida útil del firme y minimizar la utilización de recursos tanto naturales como artificiales. Para mejorar la durabilidad del firme, se intenta que la explanada sobre la que éste se apoya, reciba una fatiga siempre menor que la recibida por la mezcla bituminosa. De esta manera, se garantiza que el agotamiento de la capa de betún llega antes que el de la explanada, lo que permite aplicar un refuerzo sobre el firme antes de que toda la sección colapse.

PALABRAS CLAVE: Durabilidad Firme, Leyes Fatiga de Firmes, Cálculo Analítico de Firmes, Cálculo Empírico de Firmes.

ABSTRACT: *The present work deals with the study of the design of the section of a channel of communication, in particular the conventional Highway between Jauja and Ataura populations in the region of Junín (Peru), for longevity of the firm that provided for in the draft so that to minimize the use of resources, both natural and artificial. Main objective is to improve the longevity of the firm in such a way that the Esplanade on which will support the firm section receives one fatigue that is lower than that received by bituminous mixture, with the objective that is met before the depletion of the layer of bituminous mixture to the Esplanade of. Allowing this way apply a reinforcement of bituminous mix on this firm until arising out of the collapse of the entire section.*

KEY-WORDS: *Durability firm, fatigue laws of firm, Analytical calculation of firm, Empirical calculation of firm.*

SUMARIO: 1. Introducción 2. Análisis de la Sección del Firme 3. Discusión 4. Hipótesis y Cálculo de la Nueva Sección del Firme 5. Conclusión 6. Referencias.

1. INTRODUCCIÓN

Los datos de partida sobre los que se asientan los cálculos se han obtenido del proyecto de construcción de la carretera en estudio. Estos datos son los referentes al tráfico existente en dicha en carretera así como su división en categorías de tráfico, tráfico esperado en el año horizonte de cálculo (10 años, año 2023), y la sección de diseño del firme. Se muestran a continuación dichos datos, extraídos del expediente original.

NOMBRE DEL PROYECTO: Mejoramiento de la Carretera Valle Yacus: Tramo I (Jauja - Huertas - Molinos - Julcan - Masma - Ataura), Tramo II (Molinos - Barrio Centro), Tramo III (Masma - Huamali - Masma Chicche), Provincia de Jauja, Región Junín, Longitud total 24+595 km. [YACU13]

El proyecto se encuentra ubicado en el Departamento de Junín, Provincia de Jauja, cruza las jurisdicciones distritales de Huertas, Molinos, Julcan, Masma, Ataura, Huamali, Masma Chicche.

La carretera Valle Yacus es parte de la Ruta Departamental y Vecinal, que se inicia en el empalme con la ruta nacional PE-3S (Ataura) y se proyecta cruzando los Distritos de Masma, Julcan, Huertas, Molinos, Uchubamba y Vitoc hasta la llegada a San Ramón (empalme con la ruta nacional PE-22B). Se trata de una carretera con un bajo volumen de tránsito.

En el siguiente gráfico, figura 1.1, se muestra la composición porcentual del tráfico por tipo de vehículo:



Figura 1.1: Análisis de Tráfico Pesado/Ligero. Estación Principal Huertas (EP-01). Fuente: Expediente Original carretera Valle Yacus (2013), Elaboración Sub Gerencias de Estudios. (2006)

Con los factores destructivos del pavimento, el IMD y las tasas de crecimiento del tráfico, se calcula el número de repeticiones de ejes equivalentes a 8.2t por tipo de vehículo y luego el total por tramo. El EAL se ha calculado para el año 2023, horizonte de 10 años.

AÑO	BUS			CAMIONES										EAL ANUAL	EAL ACUMULADO	
	2 EJES	3 EJES	4 EJES	2 EJES	3 EJES	4 EJES	2S2	2S3	3S2	3S3	2T2	2T3	3T2			3T3
2012																
2013	2,466	599	0	28,767	6,594	1,250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2014	5,030	1,223	0	58,685	13,451	2,550	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2015	7,697	1,871	0	89,799	20,583	3,902	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2016	10,471	2,545	0	122,158	28,000	5,308	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2017	13,355	3,247	0	155,812	35,714	6,770	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2018	16,355	3,976	0	190,811	43,736	8,291	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2019	19,475	4,735	0	227,211	52,080	9,872	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2020	22,720	5,523	0	265,066	60,757	11,517	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2021	26,095	6,344	0	304,436	69,781	13,228	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2022	29,604	7,197	0	345,381	79,166	15,007	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabla 1.1: Tabla cálculo de ejes equivalentes de 8,2 t para 10 años. Tramo: Jauja-Ataura (ambos sentidos). Fuente: Expediente Original carretera Valle Yacus (2013).

Los datos obtenidos se muestran en la tabla 1.1 y son los que se recomiendan para el dimensionamiento del pavimento, empleando las metodologías AASHTO, [AASH93].

2. ANÁLISIS DE LA SECCIÓN DEL FIRME

Se muestra a continuación en la tabla 2.1 la sección incluida en el expediente original de dicha carretera:

ESTRUCTURACION DEL PAVIMENTO (AASHTO SIMPLIFICADO)			
	H (cm)	SN	SN REQUERIDO
Carpeta Asfáltica de Rodadura (D1)	5,0	0,846	
Capa de Base (D2)	15,0	0,905	
Sub-base (D3)	15,0	0,815	
Total		2,567	

Tabla 2.1: Estructuración del Pavimento de la sección del firme diseñada de acuerdo a la normativa AASHTO 93. Fuente: Expediente Original carretera Valle Yacus (2013).

Para analizar la sección de firme, se ha procedido en primer lugar, a la comprobación de la sección incluida en el proyecto de construcción. El cálculo se ha hecho utilizando el “Programa de Software de Cálculo del número estructural y diseño del firme por el

método de la ASSHTO” proporcionado en el Curso de Dimensionamiento de Firmes por el Método de la AASHTO. Instituto Tecnológico de la Vialidad y del Transporte INTEVÍA (2011).

Para la determinación del número estructural se utilizan los siguientes datos de entrada:

W18	476.354	Aplicaciones de eje de 18 kips en el periodo de diseño
R%	75	Fiabilidad
So	0,45	Desviación estándar
Mr(psi)	12.983	Módulo resiliente de la subrasante
Pi	4	Indice de servicio inicial
Pt	1,5	Indice de servicio final

Tabla 2.2: Determinación del número estructural la sección del firme diseñada de acuerdo a la normativa ASSHTO 93.

El resultado del cálculo del número estructural resulta ser 2,19 pulgadas (5,57cm). Los espesores calculados usando la fórmula polinómica son los siguientes:

Capa	Descripción	Coefficiente Capa, ai.	Coefficiente drenaje, mi.	Espesor Capa, pulg.	N. Estruct. SN, pulg.	Espesor Capa, cm.
1	MBC	0,43	1,00	1,97	0,85	5,00
2	Base Granular	0,13	1,15	5,91	0,90	15,00
3	Sub base Granular	0,12	1,15	5,91	0,81	15,00
SN Tanteado =					2,56	
SN Diseño =					2,19	

Tabla 2.3: Determinación de los espesores usando la fórmula polinómica de la sección del firme diseñada de acuerdo a la normativa ASSHTO 93.

A continuación se ha estudiado la sección por el método analítico. Para ello se ha utilizado el programa DEPAV, diseñado para el cálculo analítico de firmes basado en las tensiones, deformaciones y desplazamientos producidas por las cargas del tráfico que experimentan las diferentes capas del firme en función del módulo de Young, coeficiente de Poisson, espesor y unión entre capas.

Se muestra en la tabla 2.4 la entrada de datos en el programa de software DEPAV siendo los parámetros de Carga (Eje Doble Estándar 13 t), características de la mezcla bituminosa en caliente (MBC), base granular (zahorra artificial), subbase granular (zahorra natural), subrasante (explanada) y espesores que constituyen la sección de

proyecto, los aconsejados por [CEDE09] mientras que para establecer el valor del CBR a partir del módulo de resiliencia de la explanada se utiliza la relación de Heukelon y Klomp [AASH93]:

$$M_r(\text{psi})=1500*\text{CBR} \quad (\text{Ec. 2.1})$$

Aplicando para calcular el módulo de los materiales granulares, la ley de Dormun y Metcalf [CONG08] cuya expresión se muestra a continuación:

$$E_i=0,206*H^{0,45}*E_{i-1} \quad (\text{Ec. 2.2})$$

Donde:

E_i =Módulo de la capa i en Mpa.

H=Espesor de la capa granular en mm.

E_{i-1} =Módulo de la capa i-1 situada debajo de la anterior en Mpa.

Capa	E (Kg/cm2)	Coef. Poisson	Espesor (cm)	Adherencia entre Capas
1 ^a	71300	0,33	5	L
2 ^a	3403	0,35	15	L
3 ^a	1733	0,35	15	L
4 ^a	882	0,35		

Tabla 2.4: Entrada de datos del número de capas del firme, módulos de los materiales, coeficientes de Poisson, espesores y adherencia entre capas. Programa de software DEPAV.

En firmes flexibles los resultados a tener en cuenta son; la máxima deformación horizontal en la fibra inferior (ϵ_t) existente entre la capa de mezcla bituminosa y la primera capa granular y la máxima deformación vertical en la fibra superior de la explanada. (ϵ_z). Se muestran estos resultados a continuación en la tabla 2.5:

ϵ_t	$3,00 \cdot 10^{-4}$
ϵ_z	$8,87 \cdot 10^{-4}$

Tabla 2.5: Resultados de la deformación horizontal en la fibra inferior de la MBC y la deformación vertical en la fibra superior de la explanada del firme. Programa de software DEPAV.

También se calcula la ley de regresión del tráfico acumulado de acuerdo a los datos del expediente carretera Valle Yacus, obteniendo el gráfico de la figura 2.1.

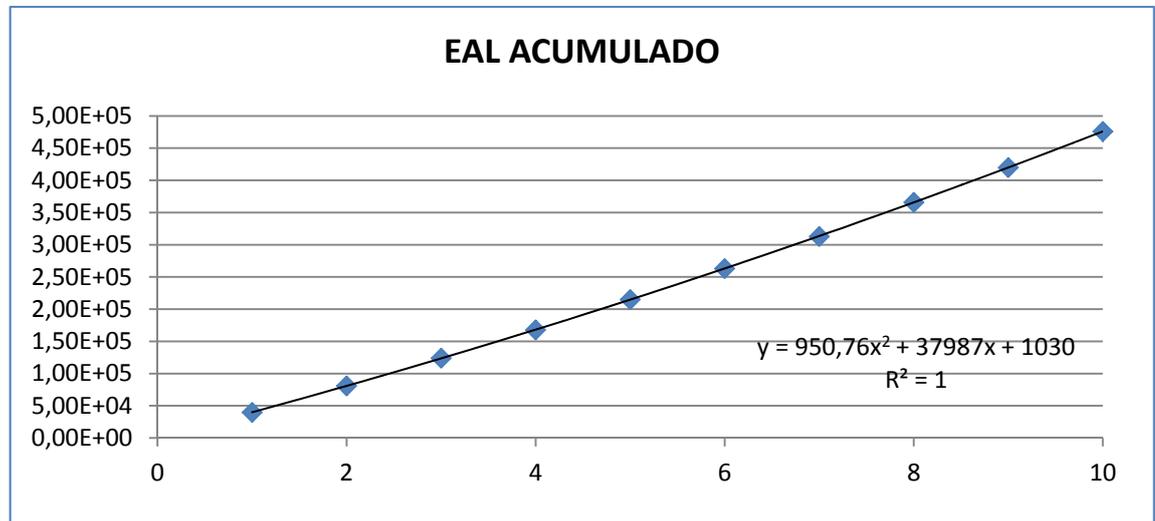


Figura 2.1: Ley de Regresión EAL acumulado según datos expediente carretera Valle Yacus.

De acuerdo a este cálculo, la ley de regresión que representa la gráfica es:

$$Y = 950,76x^2 + 37987x + 1030 \quad (\text{Ec. 2.3})$$

Es necesario transformar el número de repeticiones de ejes equivalentes de 8,2 toneladas (EAL) a volumen de Ejes Equivalentes de 13 toneladas y doble eje (EE_{13t}) para el periodo de diseño, 10 años. Para ello se utiliza la siguiente ecuación según [INTE11]:

$$W18 = \left(\frac{13}{8,2}\right)^4 \cdot EE_{13t} \quad (\text{Ec 2.4})$$

Siendo:

$$EE_{13t} = 75.373 \text{ vehículos.}$$

Se calcula la ley de regresión de los Ejes Equivalentes de 13 t acumulado, obteniendo el gráfico de la figura 2.2:

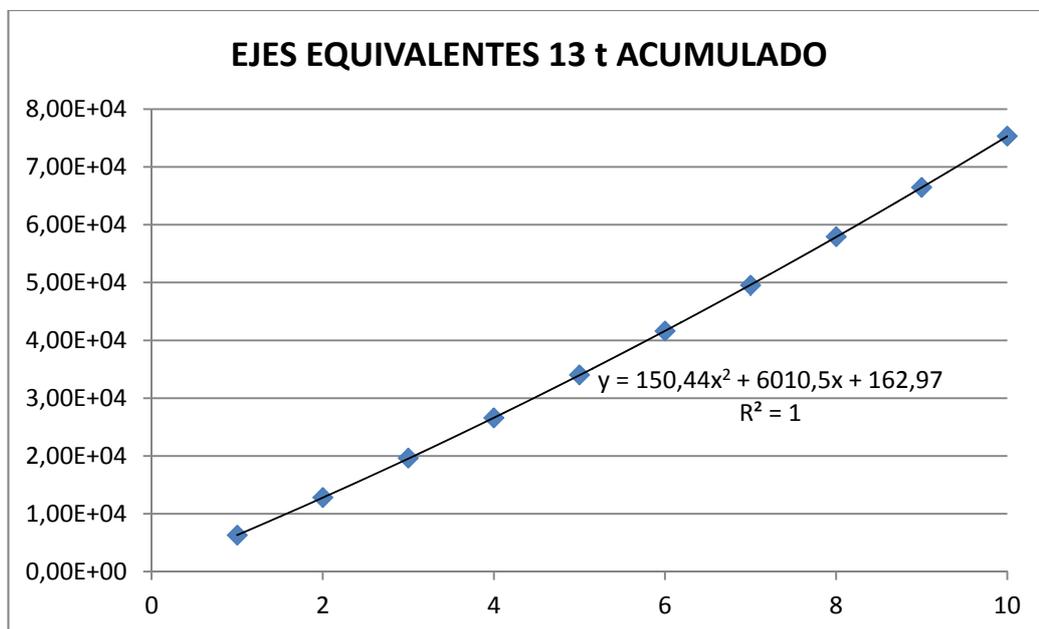


Figura 2.2: Ley de Regresión Ejes equivalentes 13 t acumulado según datos expediente carretera Valle Yacus.

La ley de regresión para este nuevo cálculo será:

$$Y = 150,44x^2 + 6010,5x + 162,97 \quad (\text{Ec 2.5})$$

Las leyes de fatiga utilizadas; son las recomendadas por [CEDE09] siendo:

Para la Mezcla Bituminosa en Caliente (MBC):

$$\epsilon_t = 6,920 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0.27243} \quad N = (6,920 \cdot 10^{-3} / \epsilon_t)^{1/0,27243} \quad (\text{Ec 2.6})$$

Para la Explanada:

$$\epsilon_z = 1,580 \cdot 10^{-2} \cdot N^{-0.25} \quad N = (1,580 \cdot 10^{-2} / \epsilon_z)^4 \quad (\text{Ec 2.7})$$

En base a los datos correspondientes a la tabla 2.5 y con estas leyes de fatiga, obtenemos la fatiga que va sufriendo la explanada y la MBC. Los resultados se recogen a continuación.

PORCENTAJE DE FATIGA CONSUMIDA			
Tráfico Total Acumulado		Porcentaje Fatiga	
V. Pesados	Eje Doble 13 t	MBC	Explanada
1,26E+05	7,53E+04	74,8%	74,8%

Tabla 2.6: Fatiga del firme de correspondiente al 10º año (2023)

PORCENTAJE DE FATIGA CONSUMIDA			
Tráfico Total Acumulado		Porcentaje Fatiga	
V. Pesados	Eje Doble 13 t	MBC	Explanada
1,68E+05	1,01E+05	100,0%	100,0%

Tabla 2.7: Fatiga del firme de correspondiente al 12,69º año (2026)

3. DISCUSIÓN

A tenor de los resultados obtenidos se observa que la fatiga recibida en el año 2026 por la MBC y la explanada sería del 100%.

De acuerdo a esto, se obtiene para un volumen acumulado de Ejes Equivalentes de 13 t de 100700 que corresponde a un volumen acumulado de vehículos pesados de 167833.

Es decir, toda la capacidad portante de la MBC y de la explanada y consecuentemente de toda la carretera quedaría agotada a los doce años y ocho meses de su construcción.

Luego estamos en condiciones de afirmar que el diseño de ésta carretera no ofrece unas garantías de durabilidad al estar descompensadas las fatigas recibidas por la explanada con respecto a las de la MBC.

4. HIPÓTESIS Y CÁLCULO DE LA NUEVA SECCIÓN DEL FIRME

En base a estos resultados se plantea redimensionar la sección del firme para disminuir la deformación de la explanada, lo cual repercutirá en la durabilidad y longevidad de la sección.

Se propone la siguiente sección equivalente, compuesta por los materiales, y espesores reflejados en la tabla 4.1, en la cual se dota de mayor espesor a la subbase granular:

Capa	E (Kg/cm ²)	Coef. Poisson	Espesor (cm)	Adherencia entre Capas
1 ^a	71300	0,33	5	L
2 ^a	3874	0,35	15	L
3 ^a	1972	0,35	20	L
4 ^a	882	0,35		

Tabla 4.1: Sección capas del firme, módulos de los materiales, coeficientes de Poisson, espesores y adherencia entre capas. .

Estos datos se han introducido en el programa de software DEPAV, para el cálculo analítico, obteniendo los resultados de la tabla 4.2.

ϵ_t	$2,70 \cdot 10^{-4}$
ϵ_z	$7,43 \cdot 10^{-4}$

Tabla 4.2: Resultados de la deformación horizontal en la fibra inferior de la MBC y la deformación vertical en la fibra superior de la explanada del firme. Programa de software DEPAV.

En las siguientes tablas se detallan las fatigas alcanzadas en los diferentes años tanto por la explanada como por la MBC:

PORCENTAJE DE FATIGA CONSUMIDA			
Tráfico Total Acumulado		Porcentaje Fatiga	
V. Pesados	Eje Doble 13 t	MBC	Explanada
1,68E+05	1,01E+05	67,9%	49,2%

Tabla 4.3: Fatiga del firme de correspondiente al 12,69^o año (2026)

PORCENTAJE DE FATIGA CONSUMIDA			
Tráfico Total Acumulado		Porcentaje Fatiga	
V. Pesados	Eje Doble 13 t	MBC	Explanada
2,47E+05	1,48E+05	100,0%	72,5%

Tabla 4.4: Fatiga del firme de correspondiente al 17,22^o año (2031)

Con la sección propuesta, en el año 2026, es decir a los doce años y ocho meses de su construcción, la fatiga alcanzada por la MBC sería del 67,90% mientras que la sufrida por la explanada del 49,20% y en el año 2031, a los diecisiete años y dos meses de su construcción, la fatiga alcanzada por la MBC sería del 100% mientras que la sufrida por la explanada del 72,50%. Estos porcentajes de fatiga hacen recomendable y a la vez posible el refuerzo del firme en el año 2026.

La solución que se va a estudiar a continuación es el fresado de la MBC y refuerzo de 5cm de firme en el año 2026, con el objetivo de aumentar la vida útil de la estructura minimizando costes de mantenimiento. Al no haberse alcanzado el 70% de fatiga de la MBC, la actuación sobre la carretera tiene una repercusión económica mínima [GEST06]. El nivel de fatiga del 70% en la MBC es marcado por la bibliografía como un límite óptimo para comenzar los trabajos de conservación de firmes y colocar un refuerzo. Superado este porcentaje, la fisuración comienza a ser visible en la superficie de la carretera y la reparación es más costosa. [AVIL06]

La Ley de Miner establece que cuando un firme tiene diferente composición y está sometido a diferentes solicitaciones, la fatiga total consumida es la suma de las fatigas consumidas cuando se halla sometido a diferentes situaciones de esfuerzos ó deformaciones, siendo la fatiga total la suma de las fatigas parciales.[MINE45]. Esta ley debe tenerse en cuenta para el estudio del refuerzo, ya que las fatigas acumuladas por la sección antes del año 2026 deben contabilizarse.

A continuación se hace el cálculo analítico tras aplicar un fresado total de la MBC y refuerzo de 5 cm al firme diseñado; en la siguiente tabla se presenta la aplicación de la ley de Miner calculando así el incremento del firme y periodo de duración de la carretera.

FIRME	NÚM. MAX. DE REPETICIONES DE CARGA			
	MBC		EXPLANADA	
	Epsi T	Max Ejes	Epsi Z	Max Ejes
INICIAL-FRESADO+5 CM	2,70E-04	1,48E+05	7,43E-04	2,045E+05
	PORCENTAJE DE FATIGA CONSUMIDA			
	Tráfico Total Acumulado		Porcentaje Fatiga	
	V. Pesados	Eje Doble 13 t	MBC	Explanada
TRAFICO FIRME 1	1,68E+05	1,01E+05	0,0%	49,2%
TRAFICO FIRME 2	1,73E+05	1,04E+05	70,1%	50,8%
	FATIGA TOTAL ACUMULADA		70,1%	100.0%

Tabla 4.5: Fatiga del firme de correspondiente a los volúmenes acumulados de tráfico de Vehículos Pesados y Ejes Equivalentes de 13 t según la Ley de Miner.

5. CONCLUSIONES

Como conclusión podemos afirmar que con la sección de proyecto a los doce años y ocho meses, año 2026, con un volumen de ejes equivalentes de 13 t acumulado de 100700 vehículos que corresponde a un volumen acumulado de vehículos pesados de

167833, la fatiga de la MBC y la explanada habrían alcanzado el 100,0% mientras que con la sección propuesta obtenemos unos cálculos que arrojan un incremento considerable en la edad de agotamiento de la sección.

Con la sección propuesta a los doce años y ocho meses la MBC alcanzaría un 67,9% de fatiga mientras que la de la explanada sería del 49,2%.

Por último, de acuerdo a los cálculos efectuados por la ley de Miner, se recomienda que en esa fecha se ejecute en dicha sección un fresado de la MBC y un refuerzo de mezcla bituminosa en caliente del mismo espesor 5cm, lo que devolvería a la carretera a unas condiciones óptimas para su tránsito otros trece años más, año 2039. Para ese año se obtendría un volumen de Ejes Equivalentes de 13 t acumulado de 204600 que corresponde a un volumen de vehículos pesados de 341000 y el firme alcanzaría un porcentaje de fatiga en la MBC del 70,1% y en la explanada del 100%.

6. REFERENCIAS

- [YACU13] Proyecto de Construcción. Mejoramiento de la Carretera Valle Yacus: Tramo I (Jauja - Huertas - Molinos - Julcan - Masma - Ataura), Tramo II (Molinos - Barrio Centro), Tramo III (Masma - Huamali - Masma Chicche), Provincia de Jauja, Región Junín, Longitud total 24+595 km. Bajo el ámbito de la Ley N° 29230. Obras por Impuestos. Banco Central del Perú (BCP). (2013).
- [AASH93] Guide for Design of Pavement. American Association of State Highway and Transportation Officials. AASHTO.(1993)
- [CEDE09] Parámetros de Cálculo Dimensionamiento Analítico cap. 10.5. pp. 221-245. Manual de Firmes de Capas Tratadas con Cemento. 2ª Edición. CEDEX-IECA. 2009.
- [CONG08] VIII Congreso Nacional de Firmes. Control de la capacidad de soporte mediante el ensayo de carga con placa dinámica. Antonio Joaquín López Roca. Valladolid. 2008.
- [INTE11] Dimensionamiento de Firmes por el método AASHTO 93. Ciesm-Intevía. 2011.
- [GEST06] Ph. D. Roger E. Smith, Ing. M. Sc. Thomas J. Freeman, Ing. M. Sc. Carlos Chang Albitres, “*Pavement Management. Gestión de Infraestructura Vial*”. Instituto de la Construcción y Gerencia. (ICG). Cap. 6, pp.75-80.(2006).
- [AVIL06] VII Congreso Nacional de Firmes, pág.17. Ávila, del 23 al 25 de Mayo de 2006.
- [MINE45] Miner, M.A, 1945 “*Cumulative Damage in Fatigue*”. J. Applied Mechanics. V 12, A 159 – A164.