

Comportamiento dinámico de una mezcla asfáltica de rodadura

Gerardo Echeverría G.

Profesor. Departamento Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 6177, Santiago, Chile

Juan Pablo Covarrubias T.

Profesor. Departamento Ingeniería de Construcción, Pontificia Universidad Católica de Chile, Casilla 6177, Santiago, Chile

Hugo García A.

Ingeniero Civil, Octava Avenida 1323-C, San Miguel, Santiago, Chile

RESUMEN: el trabajo corresponde a las primeras experiencias realizadas con miras a la definición de una metodología de ensayos para la caracterización dinámica de las mezclas asfálticas. Se propone el ensayo por flexión de viguetas prismáticas cargadas en los tercios de su luz, con una carga sinusoidal de onda completa. La metodología desarrollada se aplica a una mezcla asfáltica del tipo de las usadas para capa de rodadura, estableciéndose los valores de laboratorio para su módulo de elasticidad y curvas de fatiga, para una temperatura de 20°C y frecuencias de aplicación de la carga de 1 Hz, 3 Hz y 10 Hz.

I. INTRODUCCION

Los actuales métodos de diseño de pavimentos asfálticos que se usan en nuestro país, son de carácter empírico, lo que obliga al uso de importantes factores de seguridad que permitan, además de cubrir la dispersión propia de las regresiones utilizadas, hacer factible su aplicación en un clima distinto de aquel en que se hicieron las pruebas originales (Estados Unidos), con materiales de diferente naturaleza y con solicitaciones de tránsito propias de las condiciones locales. Estos factores de seguridad elevan el costo de las soluciones dimensionadas con dichos métodos. Entre las variables no consideradas explícitamente, es de especial significación el comportamiento dinámico de las mezclas asfálticas, cuantificado a través de su módulo de elasticidad y resistencia a la fatiga.

Por otra parte, la conservación de pavimentos ha pasado a ser, tal vez, la actividad más importante de la ingeniería vial en la actualidad. Esta actividad requiere de la permanente evaluación de los pavimentos en servicio y de la predicción de su comportamiento futuro. Tanto la evaluación de la capacidad de soporte de un pavimento en un determinado instante, como los modelos de deterioro necesarios para establecer el momento óptimo de conservación, hacen uso de la teoría de elasticidad y para ello requieren conocer, con un adecuado grado de aproximación, el valor de los módulos de elasticidad y las leyes de fatiga de las distintas capas del pavimento, así como su variación frente a distintas condiciones ambientales y de aplicación de las cargas de tránsito.

Los ensayos efectuados en este trabajo, se refieren a la caracterización dinámica de una mezcla asfáltica en caliente, del tipo de las usadas para capas de rodadura, cubriéndose en esta ocasión tres series de ensayos de fatiga, cada una con distinta frecuencia de aplicación de la carga, manteniéndose constante la temperatura de ensayo.

II. METODOLOGIA

2.1 Preparación de los ensayos

En el análisis de los pavimentos, aparece como factor determinante del comportamiento de las capas asfálticas, el esfuerzo de tracción por flexión en la superficie inferior de la capa y su consiguiente deformación unitaria (1). De allí que se haya optado por un ensayo de flexión sobre una vigueta prismática.

Para minimizar la deformación permanente por peso propio que experimenta una vigueta asfáltica montada sobre apoyos, se diseñó un ensayo de flexión reversible (carga ascendente y descendente) de onda sinusoidal completa. La vigueta se cargó en los tercios de la luz, de modo de obtener una zona de suficiente longitud (un tercio de la probeta) solicitada por un momento flexor constante y esfuerzo de corte nulo en la fibra neutra. Se diseñó y construyó un dispositivo portaprobeta especial para el tipo de sollicitación, el cual debió contar con un sistema de pernos y resortes que absorbiera la deformación plástica en el apoyo, asegurando la constancia en la sujeción de la vigueta.

Las probetas consistieron en viguetas prismáticas de 16 cm de longitud y sección rectangular de 4 cm de ancho y 5 cm de alto, con una entalladura en el tercio central de su longitud de ensayo, de modo de proporcionar una sección de 4 cm x 4 cm en la zona de falla. La longitud efectiva de ensayo de la probeta fue de 12 cm, dejando 2 cm en cada extremo para asegurar los apoyos.

Para la fabricación de las probetas, se construyó un molde metálico de gran dimensión 60 x 50 x 6 cm el cual fue provisto de láminas longitudinales para provocar la entalladura. De cada llenado del molde se obtuvo alrededor de 30 probetas útiles para ser ensayadas. Sus características de dosificación fueron las siguientes:

a) Aridos

Tamiz	% que pasa
1/2"	100
3/8"	90
N°4	67
N°8	50

N°30	25
N°50	16
N°100	11
N°200	7
Peso específico bulk	2.611 kg/m ³
Peso específico impregnado	2.627 kg/m ³
Absorción de asfalto	0.233%

b) Asfalto

Cemento asfáltico	CA 60 - 70
Dosis	6.4 ± 0.3% en peso del agregado seco

c) Mezcla (dosificación)

densidad Marshall	2.282 (kg/m ³)
estabilidad Marshall	12.130 (N)
fluencia	13.0(pulg/100)
huecos en la mezcla	4.7 (%)
V.A.M	17.8(%)

Se probaron distintos procedimientos para la compactación de la mezcla dentro del molde, buscando tanto la obtención de una densidad en torno al 100% de la Marshall de diseño como la homogeneidad de dicha densidad en toda la superficie del molde. El procedimiento adoptado fue el siguiente:

- calentamiento del molde metálico, llevándolo a una temperatura entre 70°C y 80°C.
- recubrimiento del interior del molde con grasa para facilitar el desmolde luego de compactada la mezcla.
- llenado del molde con la mezcla recién salida de la planta mezcladora, a una temperatura del orden de 155°C.
- colocación de las platinas superiores, para provocar la entalladura,
- compactación con rodillo metálico, pasado con y sin vibración,
- compactación con placa de percusión,
- compactación final con rueda neumática.

El método descrito permitió la obtención de densidades que en promedio alcanzaron el 99.5% de la densidad Marshall de diseño de la mezcla. Una vez compactada la mezcla se procedió al desmolde y luego a la confección de las viguetas, mediante cortes realizados con sierra de disco diamantando.

El ensaye de fatiga se realizó en la modalidad de tensión controlada. La amplitud máxima de las cargas a utilizar, se determinó a partir de las deformaciones unitarias radiales en la superficie inferior de las capas asfálticas, calculadas para los pavimentos de los tramos testigo del "Plan de Control y Seguimiento de Pavimentos Asfálticos" (Convenio Dirección de Vialidad-Pontificia Universidad Católica de Chile) (2), las cuales se muestran en la Tabla 1.

Para estimar las cargas que provocan deformaciones unitarias en las viguetas, similares a las de los tramos testigo, se utilizaron las expresiones de Hook y Navier:

$$\Sigma = \varepsilon E \text{ (Hook)} \quad (1)$$

$$\sigma = M/W \text{ (Navier)} \quad (2)$$

de donde:

$$M = W E \varepsilon \quad (3)$$

Para la probeta de sección 4 x 4 cm

$$M = 10.667 E \varepsilon \quad (4)$$

considerando viga con carga en los tercios

$$M = PL / 6 \quad (5)$$

y para la luz de ensaye L = 12 cm

$$P = (6 M / 12) = 0.5M \quad (6)$$

con lo que se tiene

$$P = 5.333 E \varepsilon \quad (7)$$

Aplicando la expresión (7) a las deformaciones unitarias y módulos de elasticidad mostrados en la Tabla 1 se tiene que el valor medio de P para producir en la vigueta deformaciones unitarias similares a las de los tramos testigo con base flexible es del orden de 30 kg, con un mínimo de 20 kg y un máximo de 50 kg. En consecuencia se seleccionó para cada serie de ensayos las siguientes cargas:

P ₁	= 20 kg
P ₂	= 30 kg
P ₃	= 40 kg
P ₄	= 50 kg
P ₅	= 60 kg
P ₆	= 70 kg
P ₇	= 80 kg

Las cargas de 60, 70 y 80 kg se incorporaron para incrementar el espacio de inferencia de la ley de fatiga y en consideración a que cargas mayores a las del eje estándar utilizado en los cálculos, provocarán una mayor deformación unitaria radial en las capas asfálticas.

2.2 Realización de los ensayos

Como se indicó anteriormente el efecto dinámico de la carga se simuló a través de una onda sinusoidal completa, para desarrollar una tensión reversible en cada ciclo. Para tener en cuenta el efecto de la velocidad de pasada de los vehículos sobre el pavimento, la carga sinusoidal se aplicó, sobre la probeta, con diferentes frecuencias: 1Hz, 3Hz y 10Hz que corresponden aproximadamente a velocidades de los vehículos de 6 km/h, 20 km/h y 60 km/h.

La definición de un criterio de falla por fatiga es de gran importancia, puesto que decide el momento de término del ensayo y por ende tiene influencia en los resultados finales del ensayo. Existen diversos criterios de falla considerados por la literatura especializada, entre los cuales se puede señalar:

- el número total de aplicaciones de carga para alcanzar la fractura completa de la muestra.
- el número total de aplicaciones de carga que reduce el módulo de rigidez inicial de la muestra a un nivel preestablecido.
- el quiebre en más de un 90% de la pendiente del gráfico, entre el número de aplicaciones de carga versus deformaciones permanentes asociadas.
- el número de aplicaciones de carga con el cual aparece la primera fisura en la muestra.
- el número de aplicaciones de carga con el cual la fisura alcanza la fibra neutra.

Dadas las limitaciones físicas para detener la prensa frente a una rotura violenta de la probeta, se prefirieron los criterios basados en la observación directa de la grieta y de éstos, se adoptó el definido por el instante en que la grieta alcanza la fibra neutra, debido principalmente a la dificultad de detección de la fisura en su inicio.

Se hicieron tres series de ensayos, cada una correspondiente a una determinada frecuencia de la carga: 1 Hz, 3 Hz y 10 Hz. Cada serie consideró 7 magnitudes de carga: 20, 30, 40, 50, 60, 70 y 80 kg, realizándose para cada magnitud 3 ensayos, con lo cual cada serie quedó configurada por un total de 21 ensayos. La temperatura de la mezcla se mantuvo constante, en un valor de $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$.

Adicionalmente a los ensayos de fatiga, se efectuaron ensayos de determinación de módulo elástico de la mezcla empleada, para las tres frecuencias de carga. El ensayo se hizo por compresión simple sobre probetas prismáticas de sección cuadrada de 5 x 5 cm aproximadamente y altura media 8 cm, obtenidas por corte de viguetas fabricadas en conjunto con las de los ensayos de fatiga. La conducción del ensayo se hizo según la norma ASTM 3497, utilizando 3 probetas para cada frecuencia de carga y ensayando cada probeta dos veces. La tensión aplicada fue del orden de 2.45 kg/cm².

III. RESULTADOS Y CONCLUSIONES

Los resultados de los ensayos de fatiga se presentan en las Tablas 2, 3 y 4 para series correspondientes a las frecuencias 1 Hz, 3 Hz y 10 Hz respectivamente. Los resultados de los ensayos de módulo dinámico se muestran en la Tabla 5.

Para cada serie de fatiga se buscó una correlación entre la tensión aplicada y el número de ciclos transcurridos hasta la falla, ajustándose una curva geométrica del tipo.

$$N = b \sigma^a \quad (8)$$

Los valores encontrados se muestran en la Tabla 6 y en las Figuras 1, 2 y 3 se han representado los valores individuales y la recta logarítmica de ajuste. Las expresiones desarrolladas, si bien provienen de una cantidad de ensayos relativamente pequeña como para constituir leyes de fatiga propias, permiten su comparación con las leyes de fatiga mostradas por la literatura especializada, en particular con la expresión recomendada por AASHTO en el Volumen II de la Guía para el Diseño de Estructuras de Pavimento" publicada en 1986 (3).

La fórmula presentada por AASHTO corresponde a la siguiente expresión:

$$\log N = 15.988 - 3.291 \log (\epsilon * 106) - 0.854 \log (E * 10^{-3}) \quad (9)$$

en donde:

- N = número de repeticiones de la carga que provoca la falla de la capa asfáltica
- ϵ = deformación unitaria radial en la superficie inferior de la capa asfáltica, producida por la carga
- E = módulo de rigidez (o de elasticidad) de la capa asfáltica, (psi)

La expresión (9) se puede escribir en forma exponencial quedando como:

$$N = 6.608685 * 10^{-3} * \varepsilon^{-3.291} * E^{-0.854} \quad (10)$$

siendo:

E = módulo de elasticidad, kg/cm^2

Considerando la ley de Hook, la expresión (10) se puede escribir en función de la tensión radial σ :

$$N = 6.608685 * 10^{-3} * a^{-3.291} * E^{2.437} \quad (11)$$

Como se puede apreciar, el exponente de σ de la relación AASHTO es del mismo orden de los exponentes "a" obtenidos en las regresiones desarrolladas. Este exponente es el valor de la pendiente de la recta logarítmica y representa la velocidad de falla de la mezcla asfáltica. Esto nos indicaría que la expresión AASHTO es adecuada para el análisis por fatiga, de las mezclas de rodadura del tipo de la ensayada.

Si se analizan los valores absolutos del número total de ciclos necesarios para provocar la falla, se aprecian fuertes diferencias de magnitud entre los valores entregados por la expresión AASHTO y los calculados con las ecuaciones de regresión obtenidas de los ensayos de Laboratorio. Al respecto cabe señalar que la expresión AASHTO fue desarrollada por regresión entre el número de pasadas de ejes de 18 kip y las tensiones provocadas por dichos ejes sobre el pavimento de las pistas de prueba. Esto implica que las capas asfálticas poseían las condiciones reales de apoyo y confinamiento propias de los pavimentos. En cambio las condiciones de la vigueta en laboratorio correspondieron a apoyos puntuales. Diversos investigadores informan la ocurrencia de estas discrepancias, señalando la necesidad de utilizar un factor de ajuste que multiplique el número de ciclos obtenido en laboratorio, para predecir la vida en el pavimento. Estos factores no han sido claramente definidos aún y se habla de valores que fluctúan entre 10 y 100 veces.

Los resultados de la comparación entre las curvas obtenidas por regresión de los ensayos efectuados en el laboratorio se comparan con la expresión AASHTO en la Figura 4. Las curvas AASHTO se calcularon para los valores del módulo de elasticidad de las mezcla ensayada determinados para cada frecuencia de aplicación de la carga.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica por el apoyo financiero dado a esta investigación, a través del proyecto FONDECYT 0586-89 y a la Dirección Nacional de Vialidad por su apoyo técnico y financiero a través del proyecto "Estudio para la Evaluación de la Eficacia de la Conservación en Pavimentos Asfálticos".

REFERENCIAS

1. Echeverría, G. y De Solminihac, H., "Deterioro de pavimentos asfálticos: un modelo estructural", Apuntes de Ingeniería, Vol 28, Pontificia Universidad Católica de Chile, 1987.
2. Pontificia Universidad Católica de Chile, "Plan de control y seguimiento de pavimentos asfálticos", Informes Anuales 1987 y 1988.
3. Johnson, E.G. and Hicks, R.G., "Evaluation of Effect of Uncrushed Base Layers on Pavement Performance", Transportation Research Record 1117, Washington, D.C, 1987.

Tabla 1. Deformaciones unitarias radiales y módulos de elasticidad de las capas asfálticas de los tramos testigo

Tramo	Deformación unitaria $\epsilon_r * 10^4$	Módulo de elasticidad E (kg/cm ²)
Uribe-Carmen Alto	1.0	46.000
Pita. Filtros-Antofagasta	1.9	50.000
Vallenar-Chacritas	1.7	25.000
Tongoy-Herradura	4.3	12.000
Qda. Gálvez-Amolanas	0.9	42.000
Chivato-Chigualoco 241	1.0	42.000
Chivato-Chigualoco 240	1.1	37.000
Chivato-Chigualoco 205	0.01 (1)	36.000
Longotoma-Chivato	3.5	16.000
Bulnes-Polpaico	0.14 (1)	68.000
San Bernardo-Nos	1.7 (2)	47.000
San Javier-Constitución	1.5	49.000
Tinajas-Perquilauquén	0.07 (1)	50.000
By Pass Lastarria	1.8	32.000
San Pablo-Osorno	0.2 (1)	22.000

(1) capas asfálticas construidas directamente sobre pavimento de hormigón antiguo.

(2) base estabilizada granular entre capas asfálticas y pavimento de hormigón antiguo.

Tabla 2. Ensayos de fatiga. Frecuencia 1 Hz

Probeta N°	Densidad (kg/m ³)	Carga (kg)	O-ft (kg/cm ²)	Número ciclos
A-010	2250	20	2.96	32672
A-11 8	2306	20	2.88	28111
A-023	2271	20	3.02	16508
A-102	2297	30	4.64	13994
A-113	2251	30	4.42	19831
A-1 22	2291	30	4.86	24746
A-020	2274	40	6.33	1256
A-027	2248	40	6.33	2901
A-202	2247	40	6.49	1173
A-003	2257	50	8.50	869
A-1 08	2252	50	7.93	2216
A-205	2248	50	7.21	833
A-013	2247	60	7.81	199
A-1 12	2257	60	6.92	1328
A-127	2301	60	7.20	483
A-008	2250	70	12.21	229

A-105	2307	70	11.08	840
A-120	2291	70	9.60	834
A-01 8	2259	80	11.94	114
A-129	2252	80	10.77	126
A-201	2253	80	12.96	869

Tabla 3. Ensayos de fatiga. Frecuencia 3 Hz

Probeta N°	Densidad (kg/m ³)	Carga (kg)	<Jf t (kg/cm ²)	Número ciclos
A-002	2247	20	4.46	5501 *
A-028	2284	20	3.30	34228 *
A-014	2261	20	3.64	15571 *
A-011	2247	30	4.67	6071
A-025	2262	30	4.55	27369
A-121	2310	30	4.67	18515
A-019	2289	40	6.03	16053
A-106	2303	40	5.26	26084
A-1 28	2261	40	5.51	10812
A-016	2262	50	7.64	7819
A-104	2251	50	8.43	3054
A-204	2247	50	6.65	8715
A-021	2247	60	10.80	822
A-109	2309	60	7.46	1586
A-1 1 6	2285	60	9.03	1471
A-005	2268	70	8.85	41 25
A-024	2279	70	10.64	1866 *
A-206	2247	70	10.56	703
A-01 2	2265	80	11.89	1202 *
A-103	2252	80	1 1.62	906 *
A-107	2308	80	10.65	2595

* La probeta se soltó de los apoyos durante el ensaye

Tabla 4. Ensayos de fatiga. Frecuencia 10 Hz

Probeta N°	Densidad (kg/m ³)	Carga (kg)	Oft (kg/cm ²)	Número ciclos
B-23	2283	20	3.85	237600
B-1 4	2260	20	3.75	313200
B-27	2259	30	4.64	175900 *
B-1 3	2284	30	5.37	160000 *

B-04	2237	30	5.49	92300
B-20	2298	30	5.23	101800
B-26	2266	40	7.14	70000
B-08	2255	40	5.63	73200
B-1 5	2267	40	6.83	52600 *
B-1 2	2269	50	7.04	50000
B-06	2274	50	8.50	41400
B-28	2263	50	7.91	51600
B-32	2266	60	7.41	40000 *
B-25	2257	60	10.20	20400
B-1 1	2286	60	10.23	18500
B-30	2274	70	11.96	32000 *
B-01	2265	70	12.84	4100 *
B-1 9	2257	70	13.15	4300
B-1 0	2262	70	9.88	22800 *
B-05	2288	80	15.39	1200
B-1 8	2308	80	14.29	3800 *
B-1 6	2245	80	14.28	1300 *
B-03	2270	80	13.33	1800 *

* Las probetas fallaron en el apoyo.

Tabla 5. Módulos de elasticidad de la mezcla asfáltica para distintas frecuencias

Frecuencia (Hz) desv. estandar	Probeta N°	Densidad (kg/m3)	Módulo de valor probet	elasticidad	(kg/cm2) valor medio
1	5	2276	12761	1 3357	1621
	3	2272	12617		
	4	2272	11663		
			12529		
			16071		
14502					
3	11	2256	16525	1 6713	1 694
	2	2249	171 91		
	1 3	2282	19326		
			15394		
			14233		
			18607		
1 0	9 1	2309	24403	2661 1	2152
	1 2	2247	2310		
			24106		
			27945		
			28930		
			28605		
25674					

Tabla 6. Leyes de fatiga

Frecuencia de carga (Hz)	A	b * 106	R	Syx * 103
1	-3.476	1.371	0.811	6.101
3	-3.308	3.278	0.761	5.635
10	-3.355	31.754	0.907	37.397

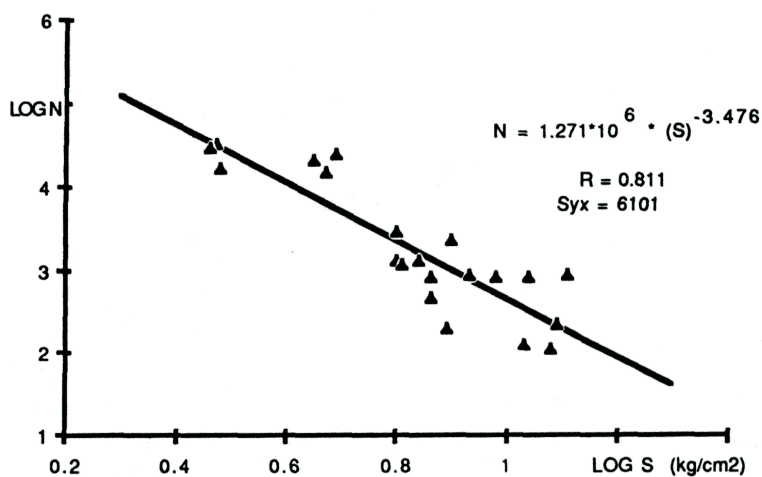


FIGURA 1. Ensayos de fatiga con frecuencia 1 Hz

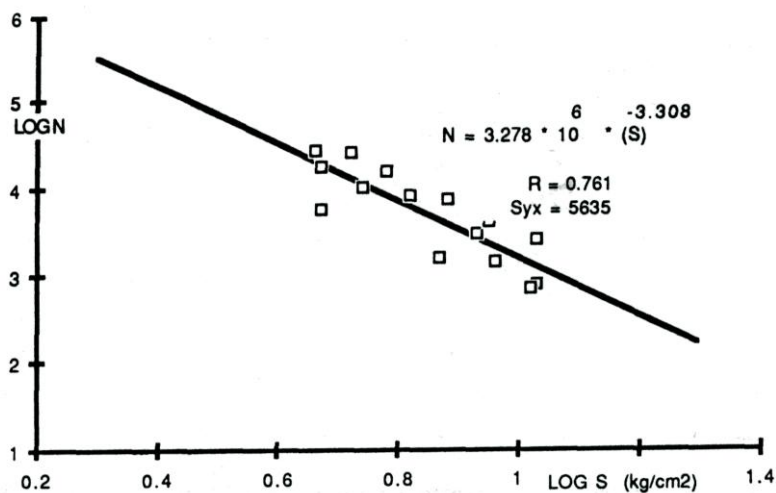


FIGURA 2. Ensayos de fatiga con frecuencia 3 Hz

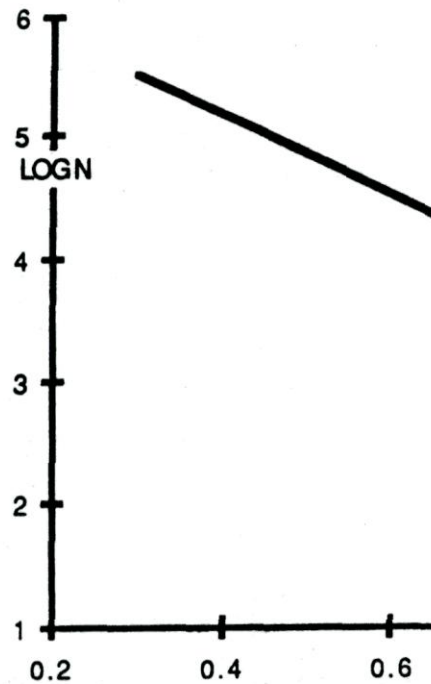


FIGURA 2. Ensayo

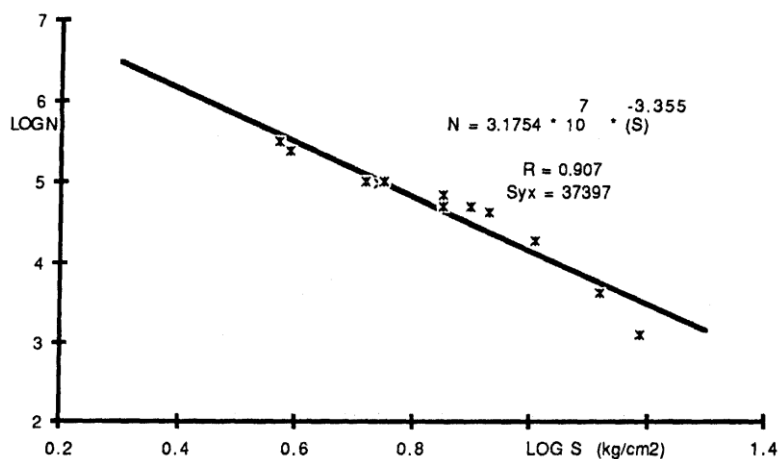


FIGURA 3. Ensayos de fatiga con frecuencia 10 Hz

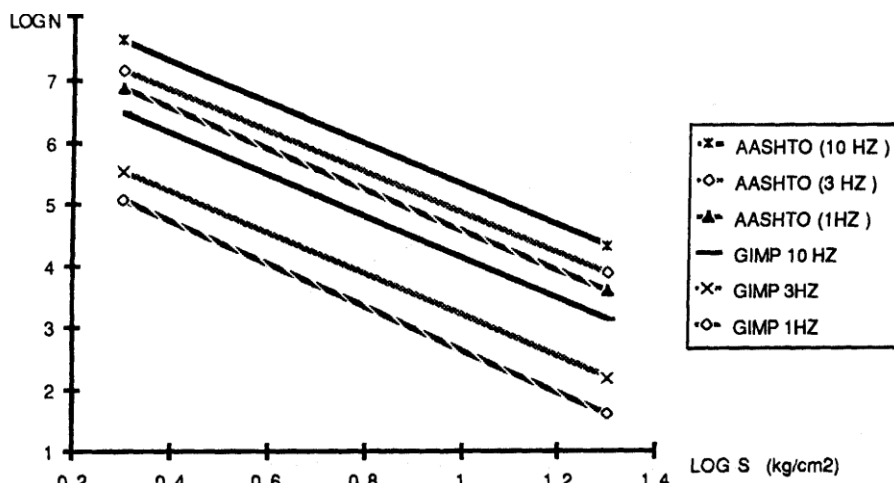


FIGURA 4. Comparación de las curvas de fatiga determinadas y la relación AASHTO