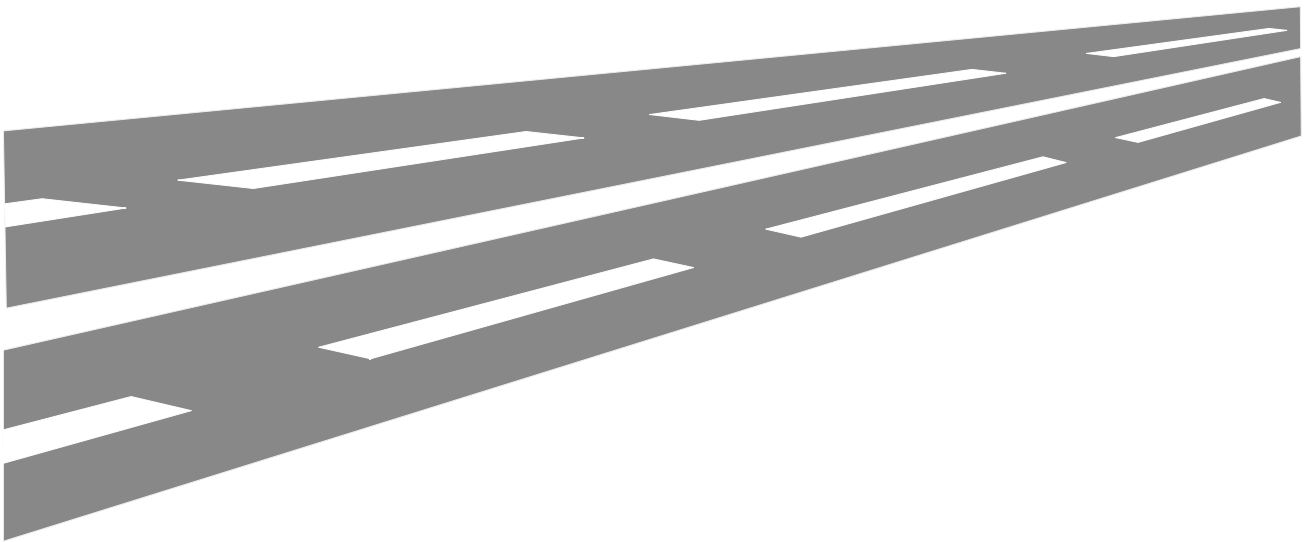


# CÁLCULO DE LEYES DE FATIGA DE MEZCLAS BITUMINOSAS



**AEPO**  
S. A. INGENIEROS CONSULTORES



## FATIGA DE MEZCLAS BITUMINOSAS

Generalmente se acepta que en la mayor parte de las situaciones, el tráfico genera un daño por fatiga del material que se inicia en la parte inferior de la capa asfáltica y se propaga hacia la superficie. En el modelo tradicional de fatiga las fisuras se originan en la fibra inferior de la mezcla bituminosa (zona donde la tensión de tracción es mayor ) y se propaga verticalmente hacia la superficie del pavimento.

Daño por fatiga significa que un estado de tensión provocado por una sollicitación, muy alejada del valor de rotura, llega a producir por acumulación (es decir, por repetición de la sollicitación un número muy elevado de veces) el agotamiento del material, agotamiento que se manifiesta por la fisuración del mismo.

Ensayos de laboratorio han verificado que la relación entre la deformación,  $\epsilon$ , (producida por la sollicitación) y la duración o vida del fatiga del material representada por el número  $N$  de veces que soporta la sollicitación antes de romperse por fatiga.  $\epsilon$  y  $N$  están ligadas por la expresión:

$$N = k_1 \epsilon^{k_2}$$

Donde  $N$  representa el número de ciclos de carga hasta la fatiga del material al nivel de deformación  $\epsilon$ , que es la deformación unitaria de tracción (en micro deformaciones  $\mu\text{m}/\text{m}$ ) y  $k_1$  y  $k_2$  constantes que describen el comportamiento a fatiga del material.

Numerosos estudios se han realizado para establecer que parámetros de la mezcla intervienen de manera significativa en la determinación de los valores de  $k_1$  y  $k_2$ . Se ha comprobado que están principalmente afectados por:

- El módulo de la Mezcla
- El contenido de betún
- La viscosidad del betún (medida por el Índice de Penetración, IP)
- La granulometría y la naturaleza de los áridos
- El contenido de aire (huecos en la mezcla)
- La temperatura del pavimento

La acumulación de daño de fatiga  $D$  en cada punto a lo largo de la carretera debido al paso de los vehículos se estima mediante la aplicación de la ley de Miner de acumulación lineal del daño .

$$D = \sum_{i=1}^j \frac{N^i}{N_f^i}$$

Donde  $N(i)$  es el número de ciclos al nivel de deformación  $\epsilon_i$ ,  $N_f(i)$  es el número de ciclos a rotura al nivel de deformación  $\epsilon_i$  y  $j$  es el número de niveles diferentes de deformación.

## MÉTODOS DE ESTIMACIÓN DE LEYES DE FATIGA

La determinación de la ley de fatiga de una mezcla bituminosa es una cuestión compleja que requiere muchos y costosos ensayos de laboratorio y calibraciones y calados posteriores del modelo in situ. Por ello se suele recurrir a los estudios genéricos realizados por laboratorios nacionales o por organizaciones con grandes recursos. Para el caso que nos ocupa se describen los dos métodos más conocidos aunque solo se aplica el método del Instituto del Asfalto para determinar las características de fatiga de la mezcla de Alto Módulo.

Los dos métodos que se recogen son los desarrollados por la SHELL y por el Instituto del Asfalto (AI).

La expresión simplificada que establece la SHELL para definir una ley de fatiga de una mezcla bituminosa es:

$$N = \left( (0.856 \cdot V_b + 1.08) \cdot (10^6 \cdot E)^{-0.36} \right)^5 \cdot \epsilon^{-5}$$

Donde  $V_b$  es el % de betún en volumen y  $E$  es el módulo de la mezcla en Mega pascales.

Por su parte el Instituto del Asfalto (AI) establece la siguiente expresión:

$$N = (0.0796 * C * (0.145 E^{-0.854}) * \epsilon^{-3.291}$$

Donde  $C$  es un factor de corrección expresado por :

$$C = 10^M$$

$$M = 4.84 * \left( \frac{V_b}{V_a + V_b} - 0.6875 \right)$$

Donde  $V_a$  y  $V_b$  son respectivamente el volumen de aire (huecos) y el volumen de betún.

Para  $V_a = y V_b = M = y C = 1$  con lo que la expresión del AI se reduce a :

$$N = 0.0796(\varepsilon^{-3.291}) * (0.145E)^{-0.854}$$

Los métodos anteriores permiten estimar el comportamiento a fatiga de cualquier tipo de Mezcla bituminosa , incluidas las Mezclas de Alto Módulo

Se ha preparado una hoja Excel donde se recogen las formulaciones anteriores y alguna otra de interes y de utilización frecuente en España.

En concreto se recogen la expresión de fatiga utilizada en el Anejo 2 “Equivalencia Estructural simplificada de Materiales Utilizados en la Rehabilitación Estructural de Firmes” del Borrador de la norma 6.3. IC Rehabilitación Estructural de Firmes . La expresión es la siguiente:

$$\varepsilon = 6.92 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0.27243}$$

$$N = 1.18 \cdot 10^{-8} \cdot \varepsilon^{-3.6706}$$

Asimismo se incluye la expresión de la ley de fatiga elaborada por el CEDEX e incluida en los trabajos del Programa de Investigación COST 324

$$\varepsilon = 6.44 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0.27243}$$

$$N = 9.06 \cdot 10^{-9} \cdot \varepsilon^{-3.6706}$$

También se recogen las aplicaciones del método SHELL realizado pro el CEDEX en sus estudios del año 1986 para el desarrollo de la Norma 6.1 y 2 IC/89

$$\varepsilon = 2.522 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0.2}$$

$$N = 1.02 \cdot 10^{-13} \cdot \varepsilon^{-5}$$

Y por último la aplicación del mismo método hecha por **ACESA** empresa concesionaria de Autopistas para mezclas convencionales y Mezclas de Alto Módulo

**MEZCLA CONVENCIONAL:**

$$\varepsilon = 2.49 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0.2}$$

$$N = 9.49 \cdot 10^{-14} \cdot \varepsilon^{-5}$$

**MEZCLA ALTO MÓDULO:**

$$\varepsilon = 1.94 \cdot 10^{-3} \cdot N^{-0.2}$$

Para todas las expresiones anteriores se ha preparado una hoja Excel que permite determinar los valores de N en función de la deformación unitaria.

Asimismo se han confeccionado las tablas siguientes:

VALORES DE FATIGA DE MEZCLAS DE ALTO MÓDULO

Leyes Fatiga MAM	SHELL		Instituto Asfalto			
	Vb (%)	E (MPa)	Va(%)	Vb(%)	E(MPa)	
			5	11	12000	
	11.00	12000	M =	0.000	C =	1.00
9.175E-14	-5.000	3.728E-07		-3.291		
ε(m/m)	N		N			
0.000070	54,588,689				17,590,021	
0.000071	50,851,190				16,787,761	
0.000072	47,416,597				16,032,556	
0.000073	44,256,653				15,321,048	
0.000074	41,346,073				14,650,162	
0.000075	38,662,199				14,017,075	
0.000076	36,184,694				13,419,195	
0.000077	33,895,281				12,854,140	
0.000078	31,777,509				12,319,715	
0.000079	29,816,551				11,813,899	
0.000080	27,999,027				11,334,826	
0.000081	26,312,843				10,880,775	
0.000082	24,747,060				10,450,152	
0.000083	23,291,765				10,041,486	
0.000084	21,937,970				9,653,413	
0.000085	20,677,510				9,284,667	
0.000086	19,502,964				8,934,075	
0.000087	18,407,576				8,600,549	
0.000088	17,385,193				8,283,074	
0.000089	16,430,199				7,980,709	
0.000090	15,537,471				7,692,578	
0.000091	14,702,321				7,417,863	
0.000092	13,920,465				7,155,801	
0.000093	13,187,975				6,905,683	

Leyes Fatiga MAM	SHELL		Instituto Asfalto			
	Vb (%)	E (MPa)	Va(%)	Vb(%)	E(MPa)	
			5	11	12000	
	11.00	12000	M =	0.000	C =	1.00
9.175E-14	-5.000	3.728E-07		-3.291		
ε(m/m)	N		N			
0.000094	12,501,255		6,666,843			
0.000095	11,857,001		6,438,662			
0.000096	11,252,181		6,220,559			
0.000097	10,684,008		6,011,990			
0.000098	10,149,917		5,812,447			
0.000099	9,647,547		5,621,453			
0.000100	9,174,721		5,438,561			
0.000101	8,729,432		5,263,351			
0.000102	8,309,827		5,095,430			
0.000103	7,914,195		4,934,427			
0.000104	7,540,952		4,779,993			
0.000105	7,188,634		4,631,802			
0.000106	6,855,885		4,489,546			
0.000107	6,541,449		4,352,933			
0.000108	6,244,161		4,221,691			
0.000109	5,962,939		4,095,561			
0.000110	5,696,780		3,974,300			

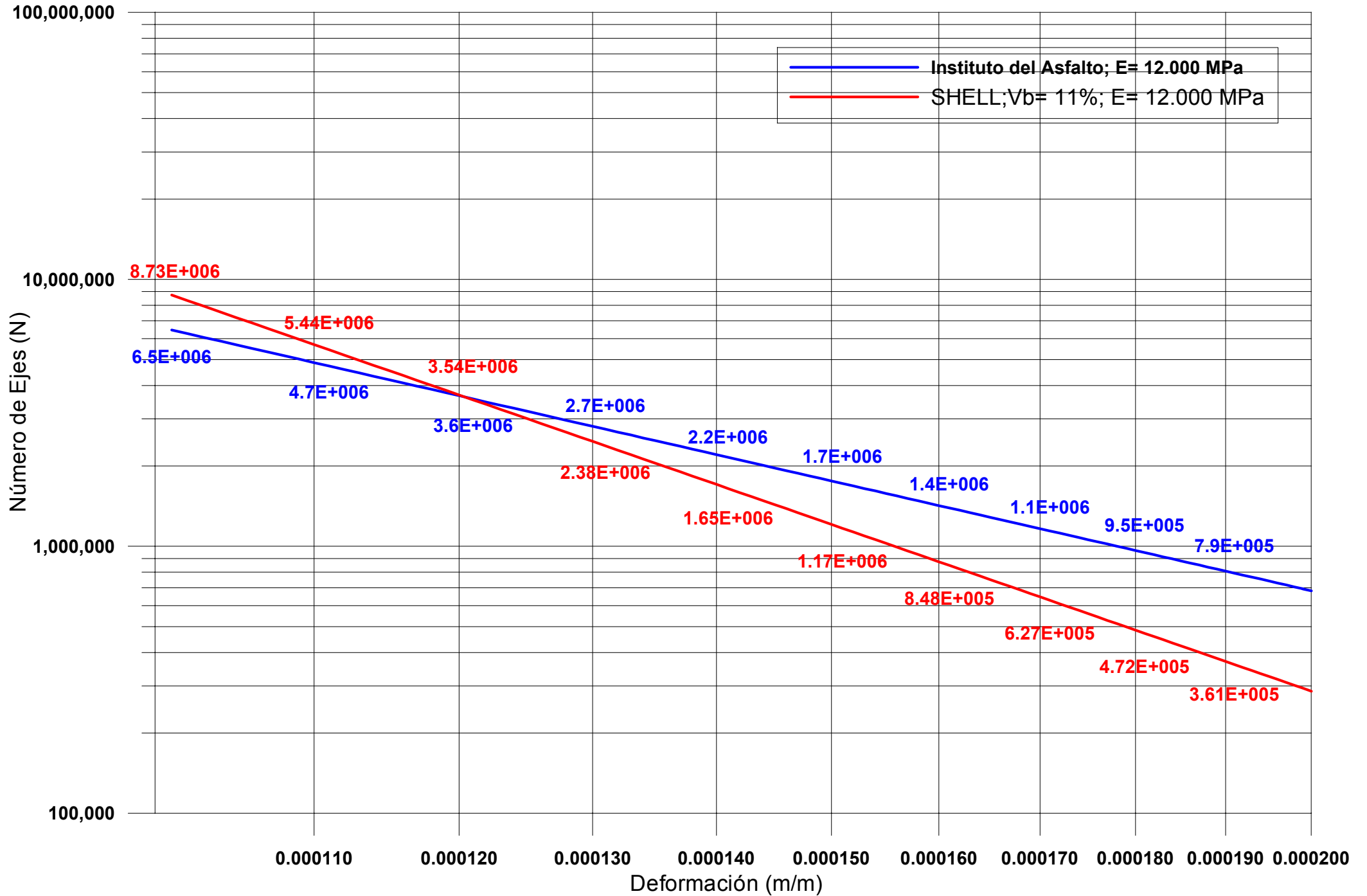
VALORES DE FATIGA DE MEZCLAS CONVENCIONALES

Leyes Fatiga	SHELL		I. Asfalto			CEDEX-COST324		Norma 6.3.I.C		SHELL-CEDEX 86		
	Vb (%)	E (MPa)	Va (%)	Vb (%)	E (MPa)		9.06 E-09	-3.6706	1.18 E-08	-3.6706	1.02 E-13	-5.0
			5	11	6000							
	11.00	6000	M =	0.00	C =	1.00						
3.195E-13	-5.000	6.739E-07		-3.291								
ε (m/m)	N		N			N		N		N		
0.000070	190,088,857		31,794,059			16,147,725		21,024,123		60,688,999		
0.000071	177,074,130		30,343,970			15,328,487		19,957,488		56,533,833		
0.000072	165,114,182		28,978,932			14,561,414		18,958,768		52,715,422		
0.000073	154,110,617		27,692,878			13,842,525		18,022,784		49,202,353		
0.000074	143,975,389		26,480,247			13,168,195		17,144,815		45,966,514		
0.000075	134,629,596		25,335,939			12,535,115		16,320,554		42,982,716		
0.000076	126,002,423		24,255,269			11,940,261		15,546,062		40,228,349		
0.000077	118,030,225		23,233,929			11,380,867		14,817,738		37,683,093		
0.000078	110,655,714		22,267,953			10,854,398		14,132,283		35,328,659		
0.000079	103,827,262		21,353,687			10,358,532		13,486,671		33,148,564		
0.000080	97,498,273		20,487,760			9,891,134		12,878,126		31,127,930		
0.000081	91,626,641		19,667,059			9,450,245		12,304,094		29,253,314		
0.000082	86,174,267		18,888,707			9,034,062		11,762,229		27,512,554		
0.000083	81,106,638		18,150,042			8,640,923		11,250,368		25,894,630		
0.000084	76,392,448		17,448,596			8,269,298		10,766,517		24,389,547		
0.000085	72,003,272		16,782,086			7,917,774		10,308,837		22,988,231		
0.000086	67,913,264		16,148,390			7,585,045		9,875,629		21,682,428		
0.000087	64,098,903		15,545,538			7,269,907		9,465,322		20,464,631		
0.000088	60,538,757		14,971,701			6,971,241		9,076,464		19,327,995		
0.000089	57,213,277		14,425,176			6,688,015		8,707,707		18,266,281		
0.000090	54,104,615		13,904,377			6,419,270		8,357,805		17,273,790		
0.000091	51,196,456		13,407,827			6,164,117		8,025,598		16,345,312		

Leyes Fatiga	SHELL		I. Asfalto			CEDEX-COST324		Norma 6.3.I.C		SHELL-CEDEX 86		
	Vb (%)	E (MPa)	Va (%)	Vb (%)	E (MPa)		9.06 E-09	-3.6706	1.18 E-08	-3.6706	1.02 E-13	-5.0
			5	11	6000							
	11.00	6000	M =	0.00	C =	1.00						
3.195E-13	-5.000	6.739E-07		-3.291								
0.000092	48,473,873		12,934,150			5,921,730		7,710,014	15,476,082			
0.000093	45,923,197		12,482,059			5,691,342		7,410,052	14,661,737			
0.000094	43,531,897		12,050,356			5,472,240		7,124,783	13,898,275			
0.000095	41,288,474		11,637,917			5,263,758		6,853,343	13,182,025			
0.000096	39,182,369		11,243,693			5,065,279		6,594,927	12,509,617			
0.000097	37,203,876		10,866,704			4,876,226		6,348,782	11,877,950			
0.000098	35,344,064		10,506,029			4,696,061		6,114,210	11,284,174			
0.000099	33,594,709		10,160,807			4,524,282		5,890,555	10,725,664			
0.000100	31,948,234		9,830,229			4,360,419		5,677,207	10,200,000			
0.000101	30,397,649		9,513,536			4,204,033		5,473,596	9,704,950			
0.000102	28,936,500		9,210,018			4,054,716		5,279,186	9,238,454			
0.000103	27,558,827		8,919,003			3,912,081		5,093,478	8,798,610			
0.000104	26,259,120		8,639,864			3,775,771		4,916,004	8,383,656			
0.000105	25,032,277		8,372,008			3,645,447		4,746,323	7,991,967			
0.000106	23,873,579		8,114,879			3,520,793		4,584,026	7,622,033			
0.000107	22,778,649		7,867,950			3,401,513		4,428,725	7,272,459			
0.000108	21,743,431		7,630,729			3,287,327		4,280,057	6,941,949			
0.000109	20,764,160		7,402,749			3,177,975		4,137,682	6,629,300			
0.000110	19,837,340		7,183,570			3,073,210		4,001,278	6,333,397			
0.000111	18,959,722		6,972,776			2,972,800		3,870,546	6,053,204			
0.000112	18,128,286		6,769,976			2,876,527		3,745,201	5,787,754			
0.000113	17,340,222		6,574,799			2,784,187		3,624,975	5,536,151			
0.000114	16,592,912		6,386,895			2,695,586		3,509,618	5,297,560			
0.000115	15,883,919		6,205,932			2,610,542		3,398,891	5,071,203			
0.000116	15,210,970		6,031,598			2,528,883		3,292,572	4,856,353			
0.000117	14,571,946		5,863,595			2,450,446		3,190,449	4,652,334			

Leyes Fatiga	SHELL		I. Asfalto			CEDEX-COST324		Norma 6.3.I.C		SHELL-CEDEX 86		
	Vb (%)	E (MPa)	Va (%)	Vb (%)	E (MPa)		9.06 E-09	-3.6706	1.18 E-08	-3.6706	1.02 E-13	-5.0
			5	11	6000							
	11.00	6000	M =	0.00	C =	1.00						
3.195E-13	-5.000	6.739E-07		-3.291								
0.000118	13,964,868		5,701,642			2,375,079		3,092,322		4,458,514		
0.000119	13,387,887		5,545,473			2,302,637		2,998,003		4,274,304		
0.000120	12,839,279		5,394,835			2,232,984		2,907,315		4,099,151		

# LEYES DE FATIGA MEZCLA DE ALTO MÓDULO



# LEYES DE FATIGA MEZCLAS CONVENCIONALES

