

ASOCIACIÓN PARAGUAYA DE CARRETERAS

COMITÉ NACIONAL

COMITÉ PARAGUAYO DE LA RED DE LA INGENIERÍA

Cámara Paraguaya de Ingenieros de la Vía

## SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

DISERTANTE:  
Dr. Ing. Luis Guillermo Loria - Costa Rica

APOYAN:

TEJÉ REMBIADO HA PARANDU  
TERRITORIO  
Ministerio de OBRAS PÚBLICAS Y COMUNICACIONES

UNIVERSIDAD NACIONAL DE ASUNCIÓN  
FACULTAD DE INGENIERÍA

COMISIÓN PERMANENTE DEL ASFALTO

CARRETERAS YALGORÁS

CAMARA PARAGUAYA DE CONSULTORES

ASOCIACIÓN PARAGUAYA DE CARRETERAS

COMITÉ NACIONAL

COMITÉ PARAGUAYO DE LA RED DE LA INGENIERÍA

Cámara Paraguaya de Ingenieros de la Vía

SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

Ing. Luis Guillermo Loría Salazar, MSc, Ph.D. / [luis.loriasalazar@ucr.ac.cr](mailto:luis.loriasalazar@ucr.ac.cr)

Twitter: Igloria27

Facebook: luisguillermoloriasalazar

Canal de youtube

Igloria27@gmail.com

LINKEDIN: [cr.linkedin.com/in/luisguillermoloria](https://www.linkedin.com/in/luisguillermoloria)






SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

---

- Lic en Ing. Civil UCR
- MSc en Ingeniería Civil, énfasis Materiales/Pavimentos, UNR-USA
- PhD en Ingeniería Civil, énfasis Materiales/Pavimentos, UNR-USA
- **180 publicaciones científicas**
- **733 informes firmados en LanammeUCR.**
- Catedrático grado 4 UCR
- Coordinador general PITRA-LanammeUCR, 2009-2019.
- Miembro titular de comités científicos
  - TRB AFD40
  - TRB AFK20
  - TRB AFD50
  - TRB AKP40
- Ex VP para LATAM de IRF
- **Presidente International Society Asphalt Pavements (ISAP)**
- Miembro Board de IJPE y RMPD
- Ex chairman HVSIA
- Consultor/diseñador de materiales y pavimentos en proyectos de Guatemala a Bolivia
- Ha impartido cursos y charlas en todos los países de Latinoamérica
- Co-ganador del premio Juan Antonio Fernández del Campo a la Innovación Tecnológica en Carreteras de la AEC en 2019.
- Co-ganador del mejor poster del EATA 2019, Granada, España.
- Socio fundador de Mat-Tech, Ingeniería y Ciencia de Materiales

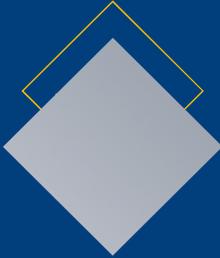







SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

---



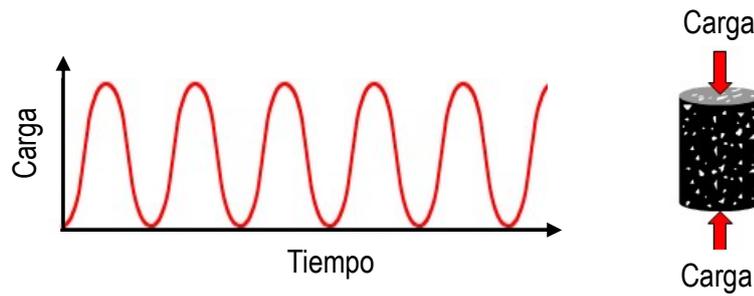
## Módulo Dinámico E\*

Capacidad mecánica (rigidez) de un material asfáltico función de la velocidad de aplicación de la carga y de la temperatura.

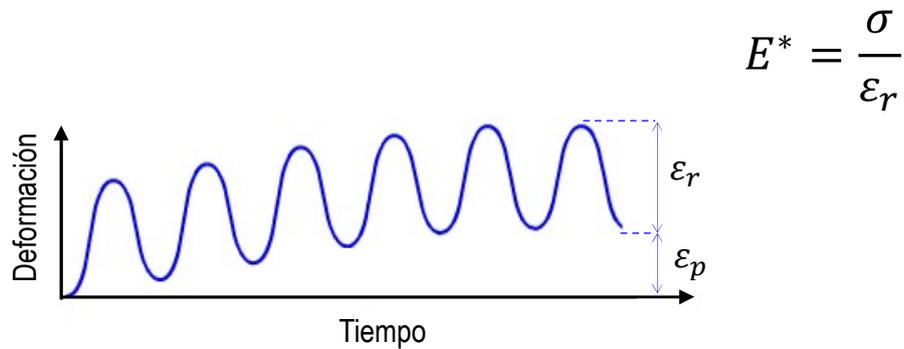


## Módulo Dinámico $E^*$

Relación esfuerzo-deformación bajo una carga sinusoidal continua

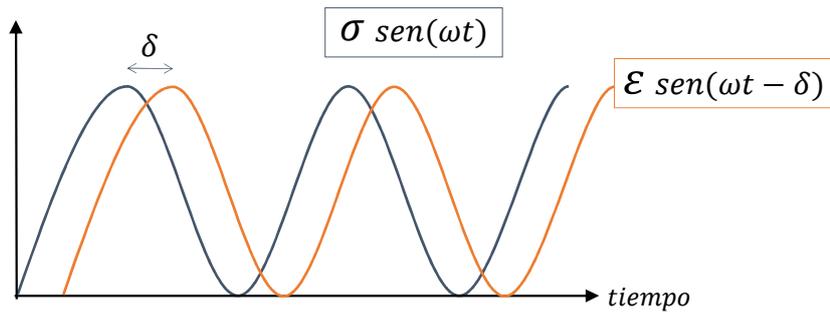


Matemáticamente:



## Módulo Dinámico $E^*$

También puede ser definida como la razón de la amplitud del esfuerzo sinusoidal en un tiempo dado ( $t$ ) y la frecuencia angular de la carga ( $\omega$ ).



## Especímenes

- ◇ Procedimiento de preparación de acuerdo a ASTM D1560 o D3387.
- ◇ 4000 g de mezcla bituminosa
- ◇ Especímenes de dimensiones 1:2
- ◇ 100 mm de diámetro por 200 mm de altura.



## Compactación y Extracción



Proceso de compactación

Extracción de núcleos






SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
 MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
 APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS



## Condiciones de ensayo

Frecuencias: 25, 10, 5, 1, 0.5 y 0.1 Hz

Temperaturas: -10, 4.4, 21.1, 38 y 54°C

Carga aplicada debe producir un esfuerzo de 10 a 100 psi (14 - 70°F) y de 2 a 10 psi (100 - 130°F).

Ciclos de carga: a 25 y 10 Hz se aplican 200 ciclos, a 5 Hz 100 ciclos, a 1 Hz 20 ciclos, a 0.5 Hz 15 ciclos y a 0.1 Hz 15 ciclos.






SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
 MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
 APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS



## Condiciones de ensayo



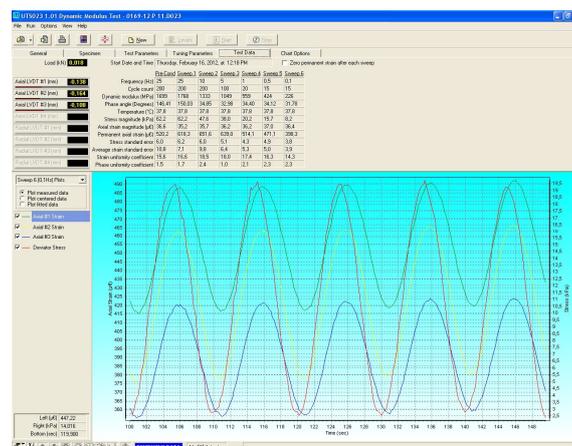
Las condiciones de ensayo pueden ser sujetas a **modificaciones** por las características del proyecto

## Descripción del ensayo

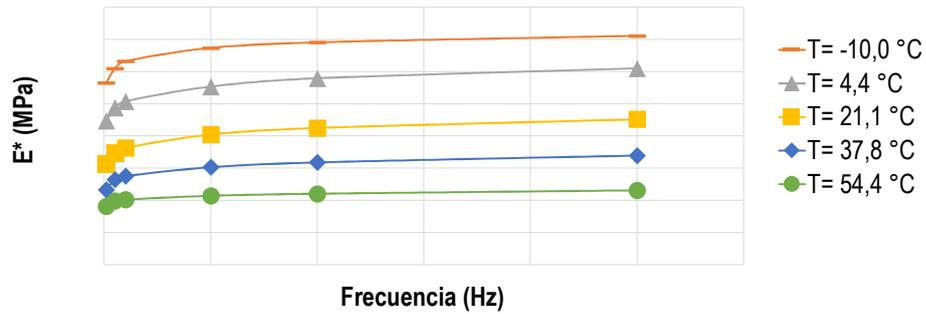
Un espécimen de mezcla asfáltica en caliente a cierta temperatura es sometida a un esfuerzo sinusoidal controlado de diferentes frecuencias.

El esfuerzo es aplicado y sus deformaciones axiales resultantes son medidas en función del tiempo, lo que permite calcular el modulo dinámico y el angulo de fase.

Salida del  
equipo



## Procesamiento de datos

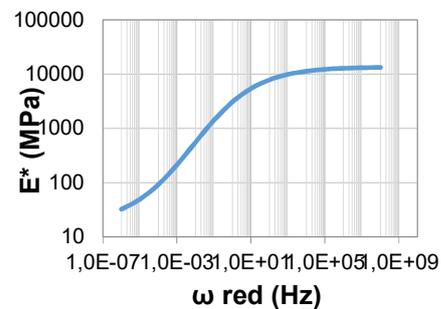


## Análisis de datos: Curva Maestra

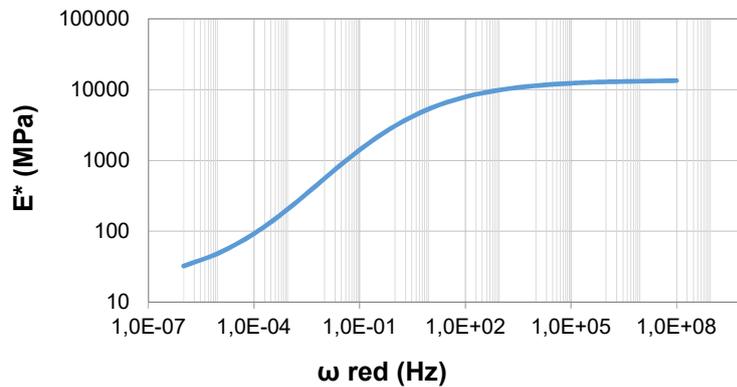
Ecuación Sigmoïdal de Mezcla Asfáltica

$$\log|E^*| = \delta + \frac{(\alpha)}{1 + e^{\beta + \gamma \log f_r}}$$

$|E^*|$  = Módulo dinámico, psi  
 $\alpha, \beta, \delta, \gamma$  = Parámetros de ajuste  
 $f_r$  = Frecuencia reducida, Hz



## Análisis de datos: Curva Maestra



## Análisis de datos

MEPDG factor de ajuste

$$\log f_r = \log f + c(\log \eta - \log \eta_{TR})$$

Donde:

$f_r$  = Frecuencia reducida  
 $c$  = Parámetro de ajuste  
 $TR$  = Temperatura de referencia  
 $\eta_{TR}$  = Viscosidad del ligante a la temperatura de referencia

Polinomio de segundo orden

$$\log f_r = \log f + a_1(T_R - T) + a_2(T_R - T)^2$$

$f$  = Frecuencia de carga  
 $\eta$  = Viscosidad del ligante  
 $T$  = Temperatura del ensayo  
 $a_1, a_2$  = Parámetros de ajuste






SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
 MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
 APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS



# APLICACIÓN EN EL DISEÑO






SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
 MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
 APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

## Diseño de pavimentos

Tránsito      Clima      **Materiales**



El módulo de la mezcla asfáltica es en uno de los principales parámetros de diseño.






SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

## Diseño de materiales

Tránsito



Clima



Materiales





El módulo de la mezcla asfáltica es en uno de los principales parámetros de diseño.






SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

## Diseño de pavimentos

Clima



Materiales



Carga





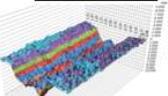
Desempeño

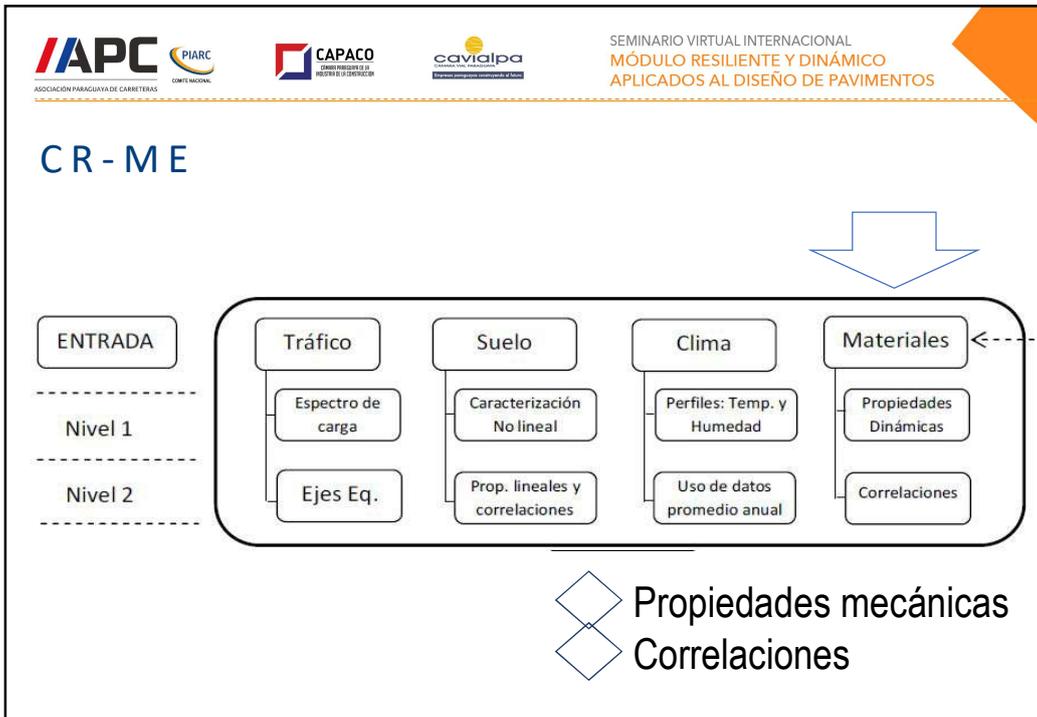
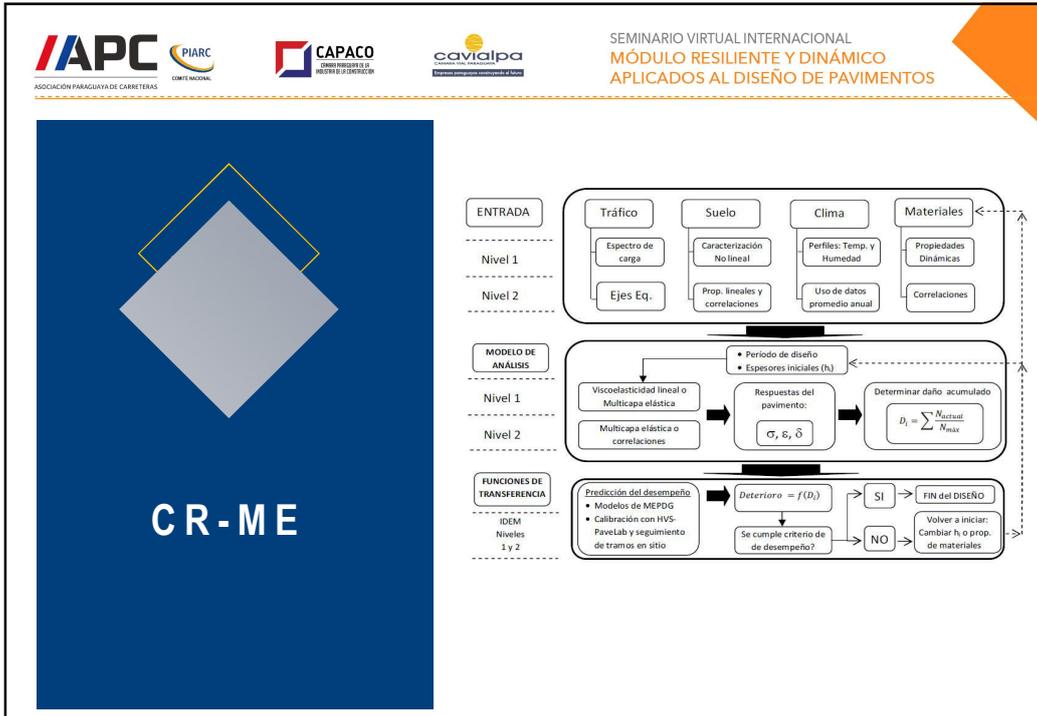


Acumulación de daño



Respuesta





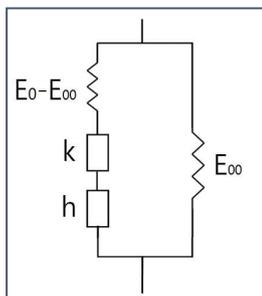
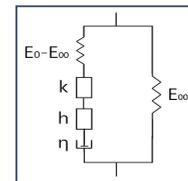
## MÉTODOS DE CALCULO

-  Modelo de Witczak 1-37 y 1-40D
-  Modelo de Hirsch
-  Modelo de Alkhateeb
-  Modelo Huet-Sayegh
-  Modelo 2S2P1D
-  Redes Neurales Artificiales

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h} + (i\omega\beta\tau)^{-1}}$$



$$\log E^* = -1.249937 + 0.02932 \rho_{200} - 0.001767(\rho_{200})^2 - 0.002841 \rho_4 - 0.058097 V_a - 0.802208 \left( \frac{V_{eff}}{V_{eff} + V_a} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021 \rho_4 + 0.003958 \rho_{38} - 0.000017 (\rho_{38})^2 + 0.005470 \rho_{34}}{1 + e^{(-0.603313 - 0.31335 \log(f) - 0.393532 \log(\eta))}}$$



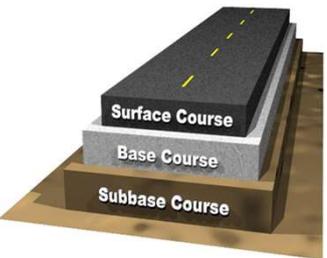
$$\log E^* = -0.349 + 0.754 |G_a|^{-0.0052} \left( 6.65 - 0.032 \rho_{200} - 0.0027(\rho_{200})^2 + 0.011 \rho_4 - 0.0001 \rho_4^2 + 0.006 \rho_{38} - 0.0001 \rho_{38}^2 - 0.08 V_a - 1.06 \left( \frac{V_{eff}}{V_{eff} + V_a} \right) + \frac{2.56 + 0.03 V_a + 0.71 \left( \frac{V_{eff}}{V_{eff} + V_a} \right) + 0.012 \rho_{38} - 0.0001 \rho_{38}^2 - 0.01 \rho_{34}}{1 + e^{(-0.7814 - 0.578585 \log(|G_a|) + 0.8834 \log(\delta_b))}} \right)$$

$$E^*(i\omega\tau) = E_0 + \frac{E_\infty - E_0}{1 + \delta(i\omega\tau)^{-k} + (i\omega\tau)^{-h}}$$



SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

**Capacidad Mecánica**

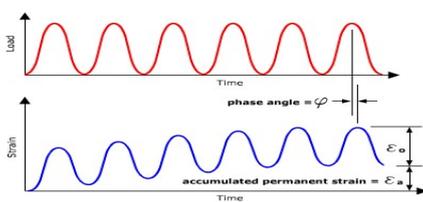


**Módulo de Diseño**  
 $E^*$

**AASHTO TP 79**



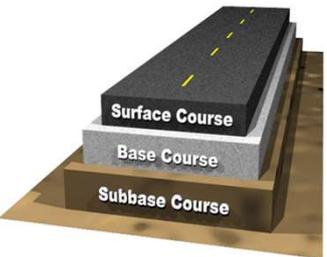
**Módulo Dinámico**






SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

**Capacidad Mecánica**



**Módulo de Diseño**  
 $E^*$

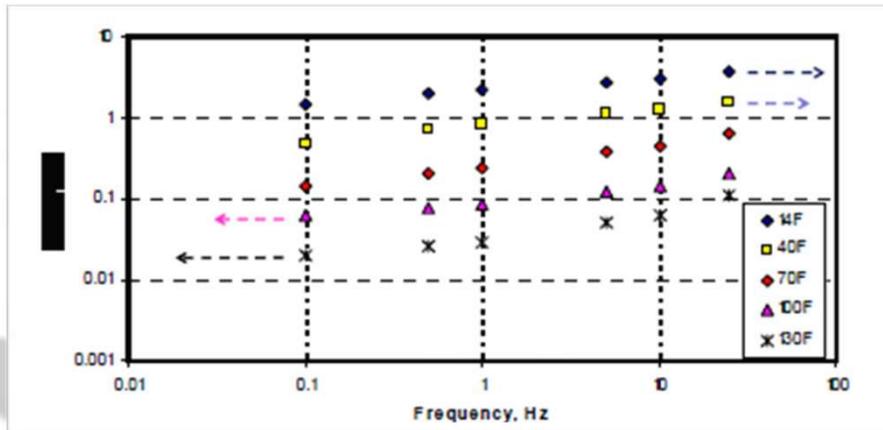
**O bien**



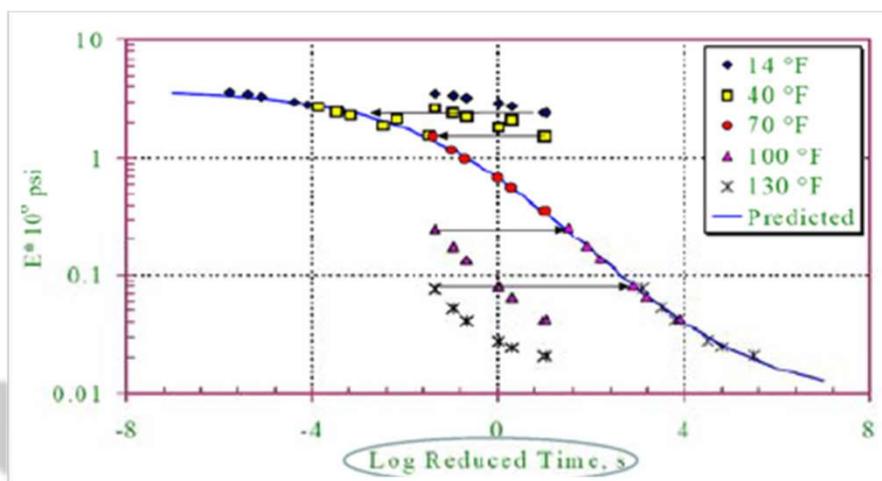
**Módulo Resiliente a Tensión Diametral**



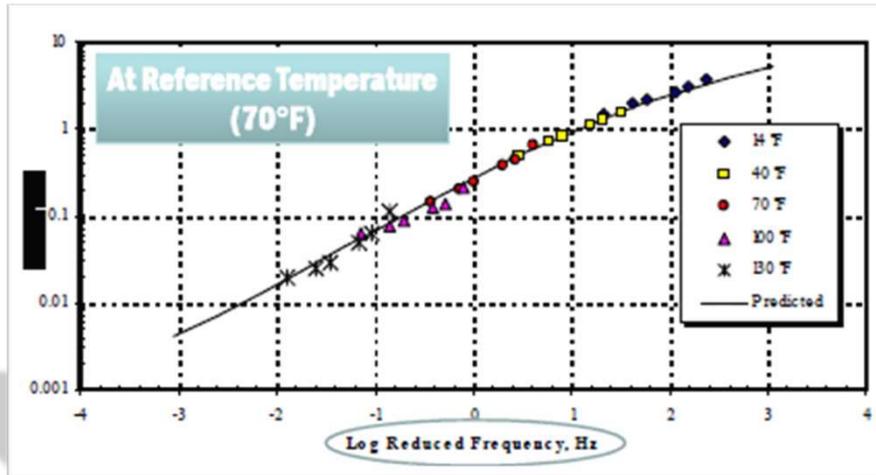
## Desarrollo de la Curva Maestra



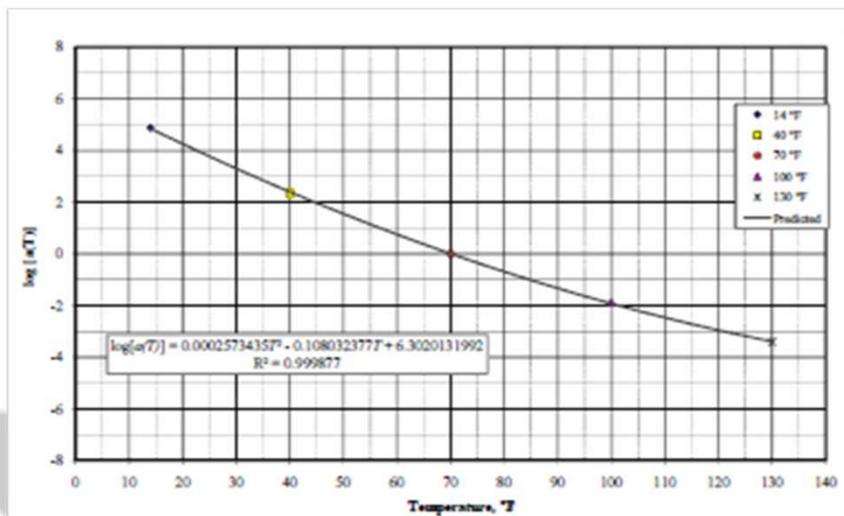
## Desarrollo de la Curva Maestra



### Desarrollo de la Curva Maestra



### Desarrollo de la Curva Maestra – factores de ajuste





SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

## Dibujo de Isotherma vs Frecuencias



SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

## Dibujo de varias isothermas vs frecuencias

## Dibujo de curva maestra

## Factores de ajuste de acuerdo con la viscosidad del ligante

$$\log(E^*) = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma (\log t_r)}}$$

$$t_r = \frac{t}{a(T)} \qquad \log(t_r) = \log(t) - \log[a(T)]$$

$$\log(t_r) = \log(t) - c(\log(n) - \log(n_{T_r}))$$

$t_r$ =tiempo de carga a la temperatura de referencia

$t$ =tiempo de carga a una temperatura de interés dada

$C$ =constante

$n$ =viscosidad del ligante a una temperatura de interés dada,  $10^6$  poise

$n_{T_r}$ =viscosidad del ligante a una temperatura de referencia  $t_r$  (en Rankine)

## Modelo Predictivo de Witczak

- Witczak expresó los parámetros de función sigmoideal como función de la mezcla volumétrica y de la gradación
- $\delta$  y  $\alpha$  dependen de la gradación del agregado, del contenido de ligante, y del contenido de vacíos
- $\beta$  y  $\gamma$  dependen de las características del ligante asfáltico y de la magnitud de  $\delta$  y  $\alpha$

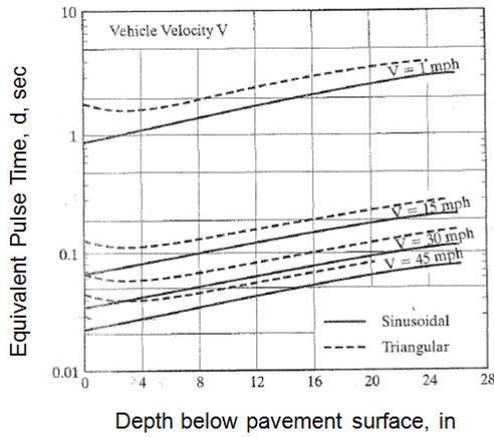
$$\log E^* = 3.750063 + 0.02932 \rho_{200} - 0.001767 (\rho_{200})^2 - 0.002841 \rho_4 - 0.058097 V_a - 0.802208 \left( \frac{V_{bef}}{V_{bef} + V_a} \right) + \frac{3.871977 - 0.0021 \rho_4 + 0.003958 \rho_{38} - 0.000017 \rho_{38}^2 + 0.005470 \rho_{34}}{1 + e^{(-0.003313 - 0.313351 \log(f) - 0.393562 \log(\pi))}}$$

- $|E^*|$  = módulo dinámico, psi;
- $n$  = viscosidad del ligante,  $10^6$  poise;
- $F$  = frecuencia de carga, Hz;
- $V_a$  = contenido de vacíos %;
- $V_{bef}$  = contenido efectivo de bitumen, % por volumen;
- $P_{34}$  = % acumulado retenido en la maya  $\frac{3}{4}$ ' (19 mm)
- $P_{38}$  = % acumulado retenido en la maya  $\frac{3}{8}$ ' (9 mm)
- $P_4$  = % acumulado retenido en la maya #4 (4.75 mm)
- $P_{200}$  = % pasando la maya #200 (0.075 mm)

**Cuál es el modelo para Paraguay?**



### Diagrama de Barksdale



**Tiempo de carga  
(1/frecuencia) en  
función de la  
frecuencia y de la  
profundidad**

### Diagrama de Barksdale

Para Sinusoidal

$$\text{Log}(t) = -0.95 \cdot \text{Log}(v) + 0.0207 \cdot h - 0.087$$

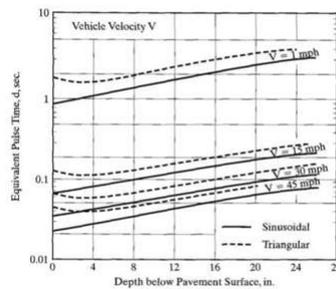
h (in)	8
v (mph)	30
t (s)	0,05
f (Hz)	21,44

$$\text{Log}(t) = -0.95 \cdot \text{log}(v) + 0.0207 \cdot h - 0.087$$

$$f = \frac{1}{t}$$

Donde:  
v: Velocidad (mph).  
h: espesor de la carpeta (in).  
f: frecuencia (s<sup>-1</sup>).

g



Ver hoja electrónica

## Qué sale de la computadora?

\*\*\*\*\*

Test date and time Thu Feb 18 2010 3:17 PM

Test results summary

	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
Dynamic modulus (ksi)	1476	1249	1082	736,9	615,3	376,6
Phase angle (Degrees)	16,53	18,72	20,55	25,33	27,03	31,19
Average temperature (°F)	40,4	40,3	40,2	40	39,6	39,4
Average confining pressure (psi)	0	0	0	0	0	0
Average micro-strain	69	71	71	72	72	70
Load drift (%)	-0,1	0,4	0,9	0,1	0	0
Load standard error (%)	3,4	1,8	1,2	0,5	0,2	0,2
Average deformation drift (%)	-132,1	-156,8	-167,8	-224,9	-218	-260,3
Average deformation standard error (%)	4,2	3,5	3	3	2,5	3,1
Deformation uniformity (%)	13,2	13,1	13,8	15	15,1	16,2
Phase uniformity (Degrees)	1,1	1,3	1,3	1,5	1,5	1,4

## Mi propio resumen...

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1									
2		<b>Mixture  E* , psi</b>							
3	<b>Temperature, °F</b>	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz		
4	14								
5	40	1458000	1242500	1085000	744400	625550	385000		
6	70	522400	390200	308600	161300	122000	61500		
7	100	166600	109950	80850	39850	30650	19800		
8	130	36000	24250	18400	11400	10400	8700		
9									
10									
11									
12									
13		25	10	5	1	0,5	0,1		
14		<b>Mixture Phase Angle</b>							
15	<b>Temperature, °F</b>	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz		
16	14							<b>14°F</b>	
17	40	16.37	18.53	20.33	25.12	26.82	31.10	<b>40°F</b>	
18	70	31.84	33.68	34.35	35.42	34.67	32.89	<b>70°F</b>	
19	100	30.23	28.75	28.21	25.40	23.93	21.06	<b>100°F</b>	

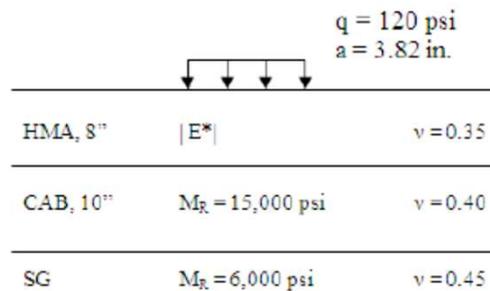
Determine la curva maestra para una MAC

Temperature, °F	Mixture $ E^* $ , psi					
	25 Hz	10 Hz	5 Hz	1 Hz	0.5 Hz	0.1 Hz
14						
40	1458000	1242500	1085000	744400	625550	385000
70	522400	390200	308600	161300	122000	61500
100	166600	109950	80850	39850	30650	19800
130	36000	24250	18400	11400	10400	8700



Ver hoja electrónica

Para una capa de 8 pulg., determine el tiempo de carga y el módulo dinámico, para una velocidad de tráfico de 30 mph, y 1 mph, a las profundidades 1, 3, y 5 pulg por debajo de la superficie del pavimento (use el pulso de carga haversive, de la figura 7.3, página 281, Yang-Huang)



V = 30 mph				
Z, in	t, sec	f, Hz	E*, psi	
1	0.035	28.3	800.000	
3	0.040	25.0	780.000	
5	0.045	22.4	760.000	
7	0.049	20.2	750.000	
				Average E* (psi) = 772.500
V = 1 mph				
Z, in	t, sec	f, Hz	E*, psi	
1	0.910	1.10	315.000	
3	1.010	0.99	310.000	
5	1.020	0.98	307.000	
7	1.035	0.97	305.000	
				Average E* (psi) = 309.250

Calcule el número de repeticiones de carga  $N_f$ , que cause agrietamiento por fatiga en la parte superior de la capa de HMA, para una velocidad de 30 mph, y 1 mph. Use  $E^*$  promedio de (2.1), para una capa de HMA Modelo del Instituto del Asfalto para 20% de área agrietada.

$$N_f = 0.0796x \left( \frac{1}{\epsilon_t} \right)^{3.291} \left( \frac{1}{E_1} \right)^{0.854}$$

	V = 30 mph	V = 1 mph	
Módulo dinámico, MAC	772500	309250	60% disminución
Deformación a tensión máxima	95,41	189,2	98% aumento
Nf	12 700 000	2 916 360	77% reducción

## IMoDin 1.1

Interfaz gráfica de cálculo del Módulo Dinámico.  
 Versión 1.1



**DATOS DE ENTRADA DE LA MEZCLA ASFÁLTICA**

Ensayos de módulo dinámico a diferentes temperaturas y frecuencias

	Temperatura (F)	Frecuencia (Hz)	Módulo(ksi)	Angulo de fase (°)
1	14	25	2.3226e+03	3.4000
2	14	10	2.2524e+03	4.6000
3	14	5	2194	5.2000
4	14	1	1.9923e+03	6
5	14	0.5000	1911	6.4000
6	14	0.1000	1.7072e+03	7.8000
7	40	25	1.8804e+03	8.3000
8	40	10	1.7530e+03	9.1000
9	40	5	1.6719e+03	10.2000
10	40	1	1.3853e+03	11.9000
11	40	0.5000	1.2777e+03	13
12	40	0.1000	1.0349e+03	16.2000
13	70	25	1013	23
14	70	10	919.2000	24.4000
15	70	5	809	25.8000

Datos de volumetría del modelo (Híresh)

VMA:   
 VFA:   
 R. de Poisson:






SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

## IMoDin 1.1

Interfaz gráfica de cálculo del Módulo Dinámico.  
Versión 1.1



**Dispersión de datos**      **Choque de curvas**

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA      **CONSTRUCCIÓN DE CURVAS MAESTRAS**



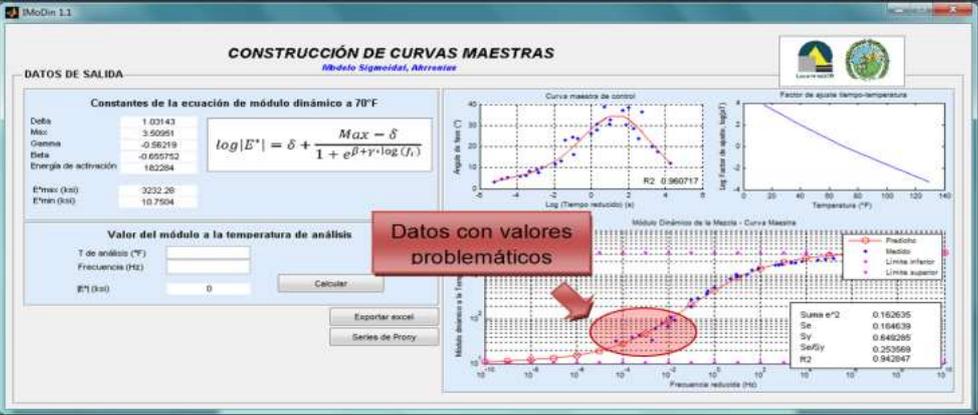



SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

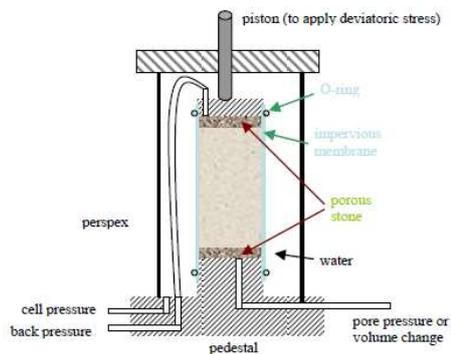
## IMoDin 1.1

Interfaz gráfica de cálculo del Módulo Dinámico.  
Versión 1.1



**Datos con valores problemáticos**

## Módulo de Resiliencia Granulares



La tabla siguiente, muestra los resultados de pruebas del módulo de resiliencia (pruebas de repeticiones de carga) para un material granular. La distancia entre LVDT, es 4". El promedio de deformación recuperable, medido por los dos LVDT luego de 200 repeticiones para cada esfuerzo desviador se muestran en la siguiente tabla:



SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

$\sigma_3$ (psi)	$\sigma_d$ (psi)	$\delta_r$ (0.001 in.)	$\epsilon_r$ ( $\times 10^{-3}$ )	$M_R$ ( $\times 10^3$ psi)	$\theta$ (psi)
20	1	0.205			
	2	0.446			
	5	1.005			
	10	2.029			
	15	3.119			
	20	3.998			
15	1	0.260			
	2	0.512			
	5	1.300			
	10	2.500			
	15	3.636			
	20	4.572			
10	1	0.324			
	2	0.672			
	5	1.740			
	10	3.636			
	15	3.872			
	20	4.572			
5	1	0.508			
	2	0.988			
	5	2.224			
	10	3.884			
	15	5.768			
	20	7.536			
1	1	0.636			
	2	0.880			
	5	2.704			
	7.5	3.260			
	10	4.444			
	20	7.536			

Cálculo "a mano"

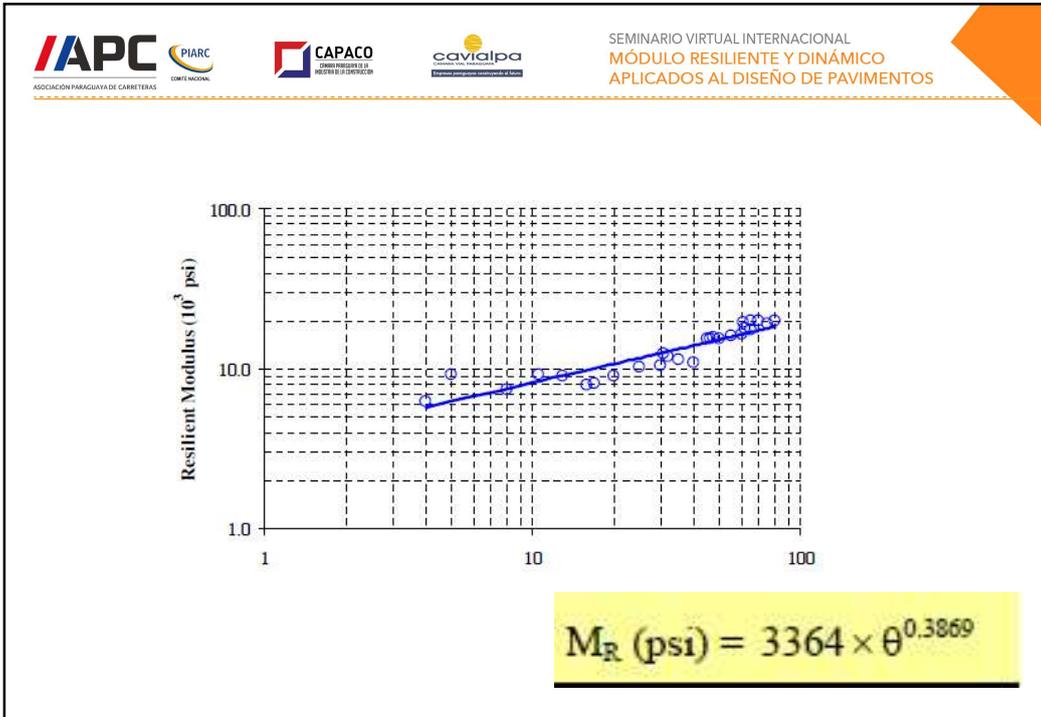
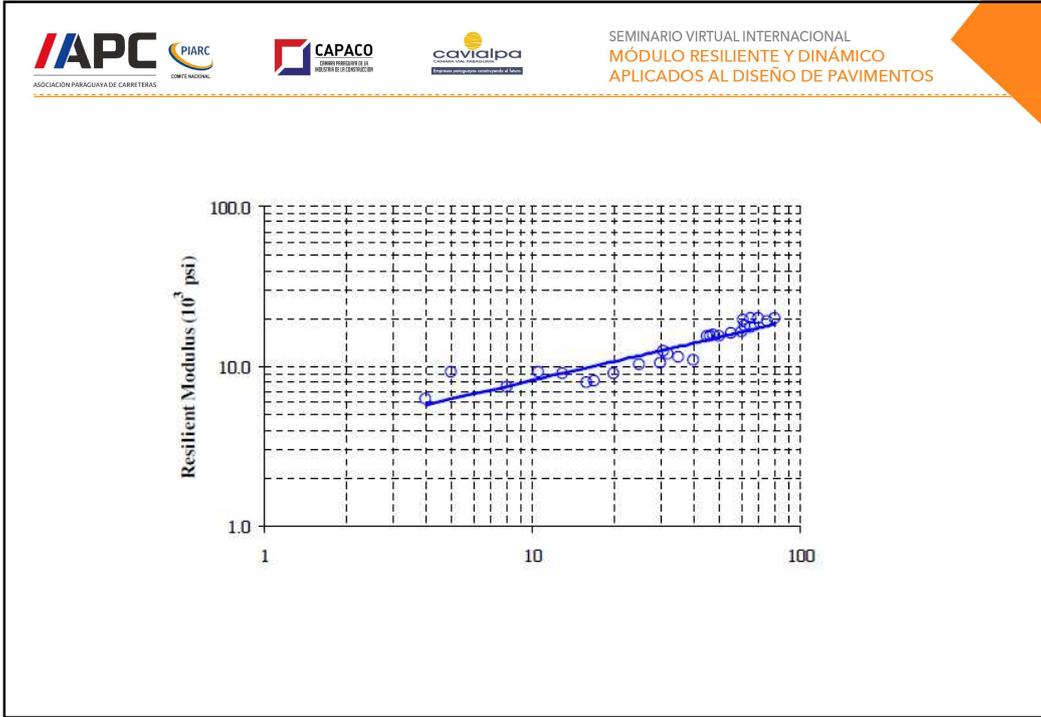
$$\epsilon_r = \frac{\delta_r}{4} \quad M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r}$$

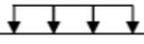
$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$$



SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

$\sigma_3$ (psi)	$\sigma_d$ (psi)	$\delta_r$ (0.001 in.)	$\epsilon_r$ ( $\times 10^{-3}$ )	$M_R$ ( $\times 10^3$ psi)	$\theta$ (psi)
20	1	0.205	0.051	19.5	61
	2	0.446	0.112	17.9	62
	5	1.005	0.251	19.9	65
	10	2.029	0.507	19.7	70
	15	3.119	0.780	19.2	75
	20	3.998	1.000	20.0	80
15	1	0.260	0.065	15.4	46
	2	0.512	0.128	15.6	47
	5	1.300	0.325	15.4	50
	10	2.500	0.625	16.0	55
	15	3.636	0.909	16.5	60
	20	4.572	1.143	17.5	65
10	1	0.324	0.081	12.3	31
	2	0.672	0.168	11.9	32
	5	1.740	0.435	11.5	35
	10	3.636	0.909	11.0	40
	15	3.872	0.968	15.5	45
	20	4.572	1.143	17.5	65
5	1	0.508	0.127	7.9	16
	2	0.988	0.247	8.1	17
	5	2.224	0.556	9.0	20
	10	3.884	0.971	10.3	25
	15	5.768	1.442	10.4	30
	20	7.536	1.880	10.4	30
1	1	0.636	0.159	6.3	4
	2	0.880	0.22	9.1	5
	5	2.704	0.676	7.4	8
	7.5	3.260	0.815	7.4	8
	10	4.444	1.111	7.4	8
	20	7.536	1.880	7.4	8





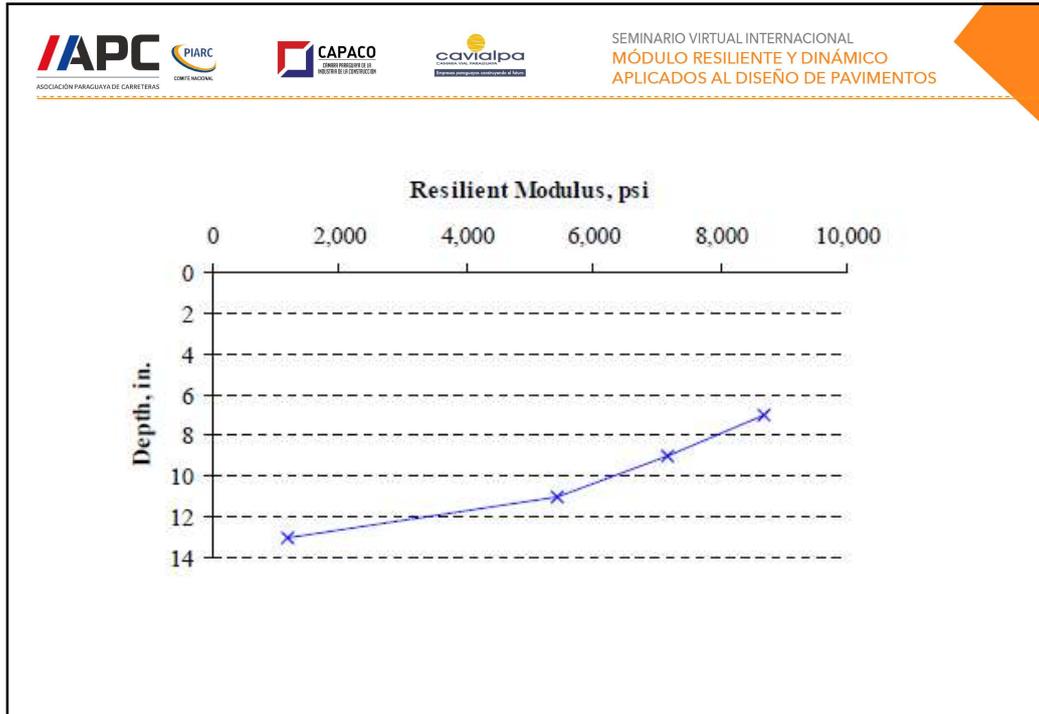
HMA, 6"	$M_R = 300,000 \text{ psi}$	$\nu = 0.35$
CAB, 8"	$M_R = 20,000 \text{ psi}$	$\nu = 0.40$
SG	$M_R = 10,000 \text{ psi}$	$\nu = 0.45$

Asumiendo que el E de la base es de 20000 psi:  
 Calcular el  $M_r$  a 4 profundidades

PITRA-Pave, 3D-move, etc...

$$\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = \sigma_1 + 2\sigma_3 = \sigma_d + 3\sigma_3$$

Depth, inch	Stress Invariant $\theta$ (psi)	$M_R$ (psi) = $3364 \times \theta^{0.3869}$
7	-11.686	8,708
9	-7.101	7,182
11	-3.444	5,428
13	-0.065	1,168



APC ASOCIACIÓN PARAGUAYA DE CARRITERAS  
PIARC COMITÉ NACIONAL  
CAPACO COMITÉ PARAGUAYO DE INGENIEROS Y TECNÓLOGOS  
cavalpa COMITÉ NACIONAL DE INGENIEROS Y TECNÓLOGOS

SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL  
MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO  
APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

# Muchas gracias