

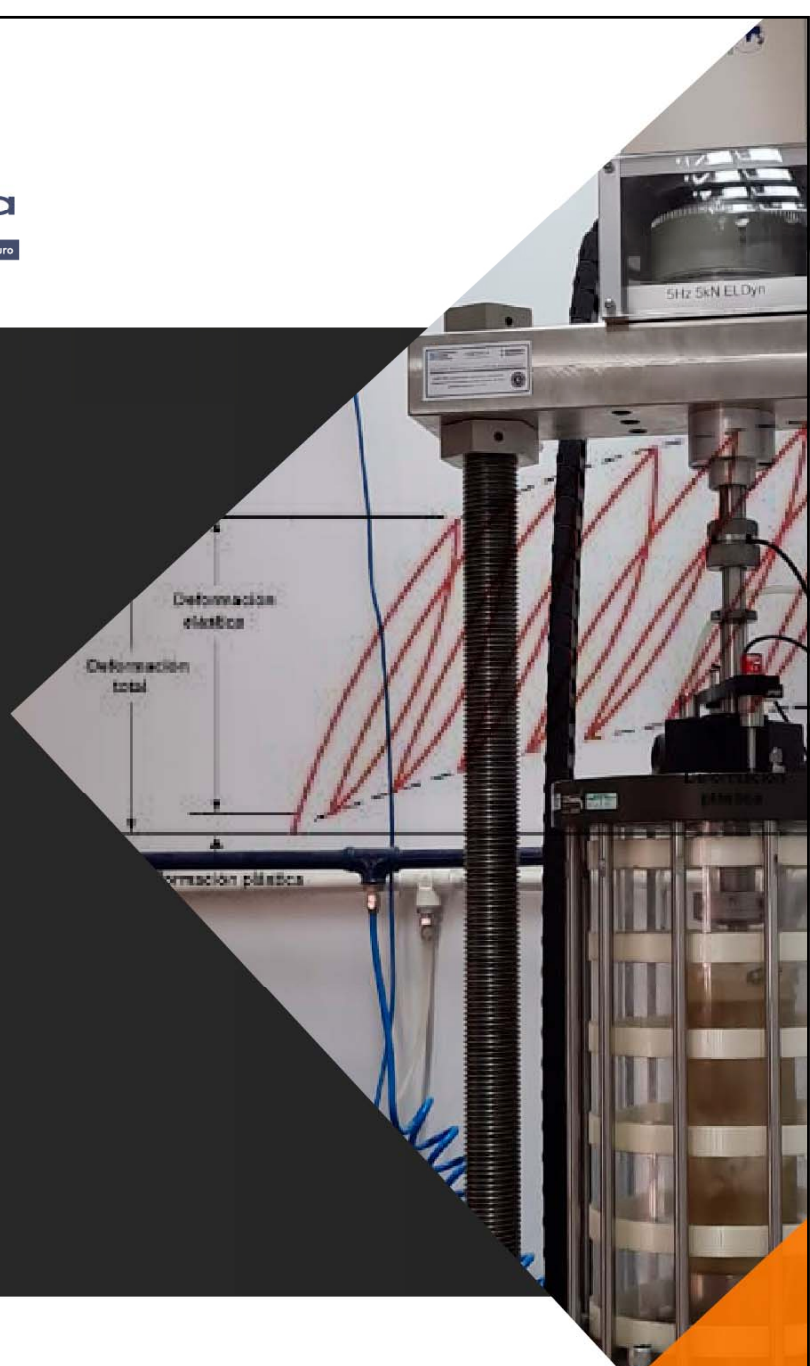


SEMINARIO VIRTUAL INTERNACIONAL

MÓDULO RESILIENTE Y DINÁMICO APLICADOS AL DISEÑO DE PAVIMENTOS

DISERTANTE:

Dr. Ing. Fernando Oscar Martínez - Argentina



APOYAN:



TETÁ REMBIAPO
HA MARANDU
Moronondcha
Ministerio
OBRAS PÚBLICAS
Y COMUNICACIONES



UNIVERSIDAD NACIONAL
DE ASUNCIÓN
FACULTAD DE
INGENIERÍA



COMISIÓN PERMANENTE
DEL ASFALTO

CARRETERAS
Y ALGO MÁS



CAMARA
PARAGUAYA DE
CONSULTORES



Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas

Prof. Dr. Ing. Fernando Martínez

Laboratorio Vial

Instituto de Mecánica Aplicada y Estructuras (IMAE)

Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Universidad Nacional de Rosario. **Argentina**



Imæ

FCEIA
FACULTAD DE
CIENCIAS EXACTAS,
INGENIERIA Y AGRIMENSURA

UNR

Diseño M-E de pavimentos flexibles



- ✓ Diseño estructural de los pavimentos flexibles orientado a principios mecánicos
- ✓ Caracterización de los materiales componentes considerando propiedades fundamentales
- ✓ Para las mezclas asfálticas, el **Módulo Dinámico $|E^*|$** es la **propiedad de mayor interés:**



- distribución de tensiones y deformaciones en las capas componentes del pavimento
- vinculado al deterioro por fatiga y acumulación de deformaciones permanentes

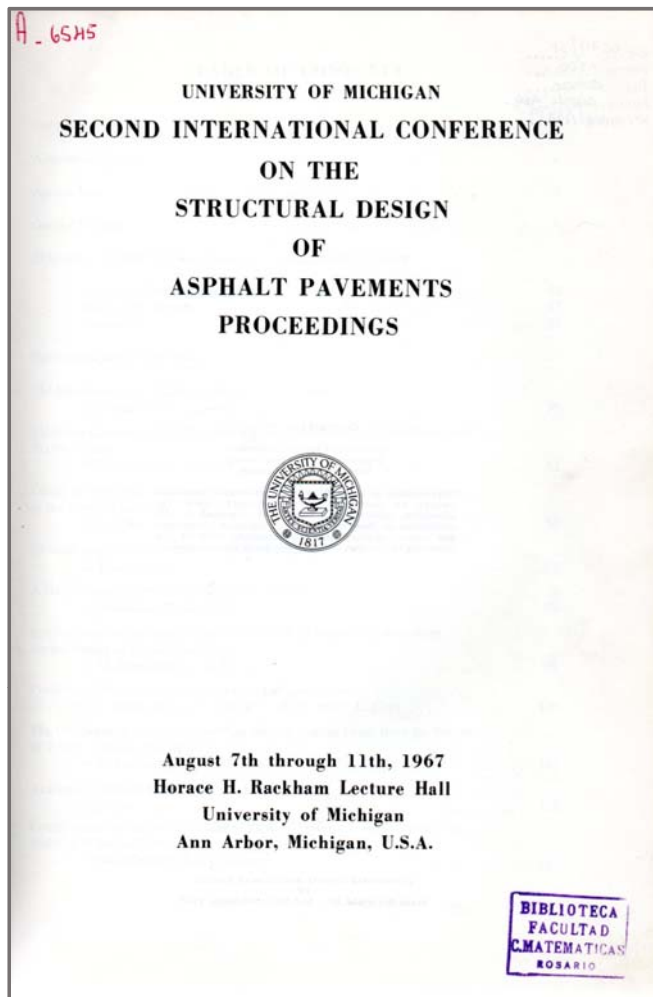
El Módulo Dinámico $|E^*|$



- Propiedad fundamental elegida para caracterizar la “rigidez” de las mezclas asfálticas
- Dependiente de
 - la temperatura
 - la frecuencia de aplicación de las cargas (tiempo de aplicación)
- Propiedades intrínsecas de la mezcla:
 - Rigidez del ligante asfáltico
 - ✓ composición granulométrica
 - ✓ contenidos volumétricos de asfalto y vacíos

Material termo-visco-elástico

Antecedentes (1967)

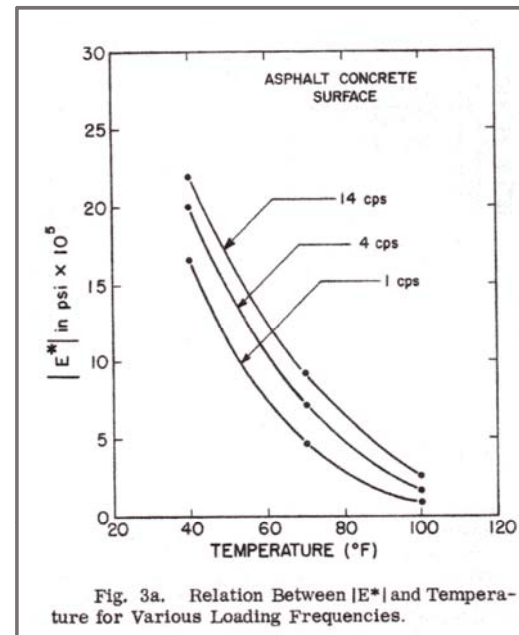


MECHANICAL PROPERTIES OF ASPHALT PAVEMENT MATERIALS*

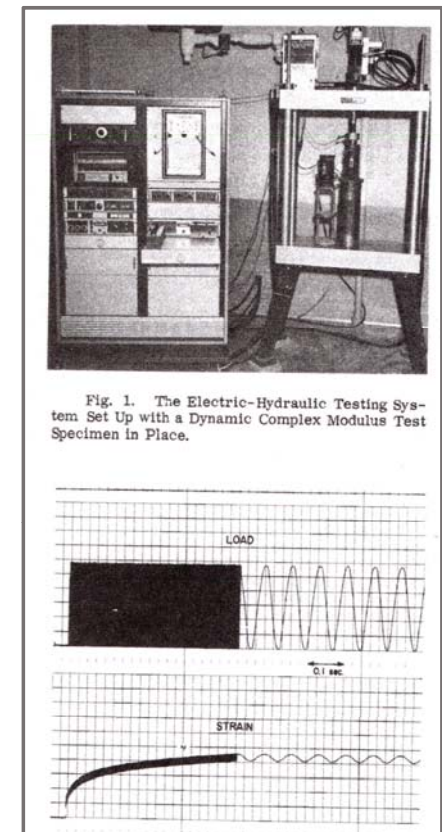
by B. F. Kallas and J. C. Riley**

SYNOPSIS

paper presents results of studies on the mechanical properties of the materials constituting t
an experimental asphalt base project constructed by the State of Colorado. The initial inv



Kallas & Riley
Asphalt Institute, EE.UU



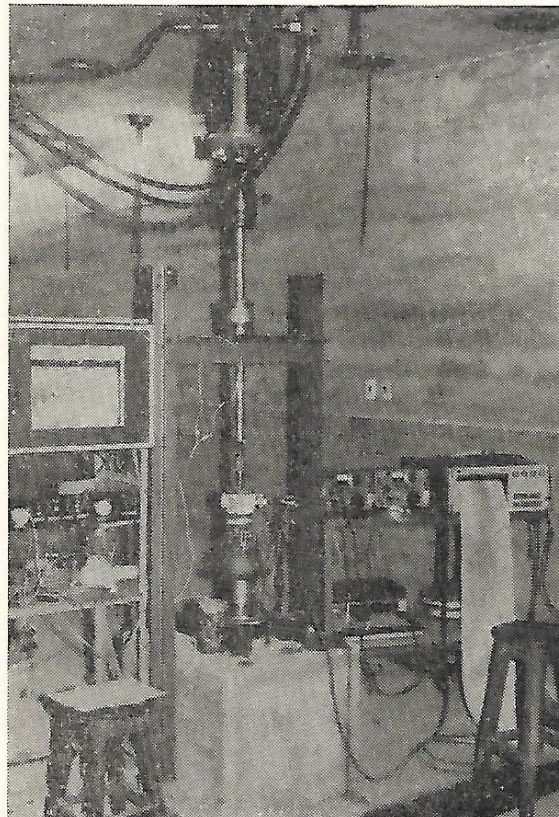
Antecedentes (1978)

Comisión
Permanente
del Asfalto

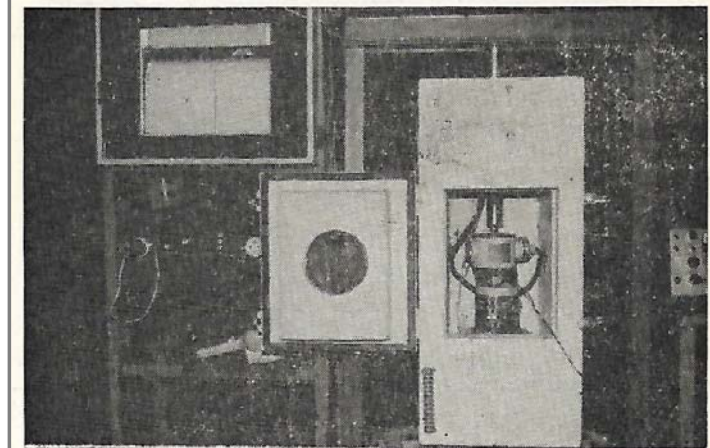
VIGESIMA PRIMERA REUNION DEL ASFALTO

DETERMINACION EN LABORATORIO DEL MODULO DE ELASTICIDAD DINAMICO DE MEZCLAS ASFALTICAS

Por los Ings. *JORGE R. TOSTICARELLI,*
RODOLFO BORGAZZI y *RAUL FERRERO **



Foro Nº 4. – Vista de conjunto dispositivos experimentales.



Foro Nº 7. – Sistema de regulación, control y registro de temperaturas. Cámara montada sobre el pórtico con puerta abierta, Registrador LER y relays de comando.

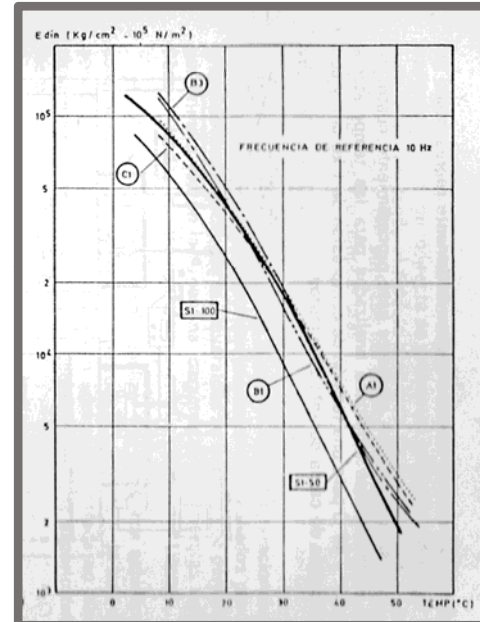
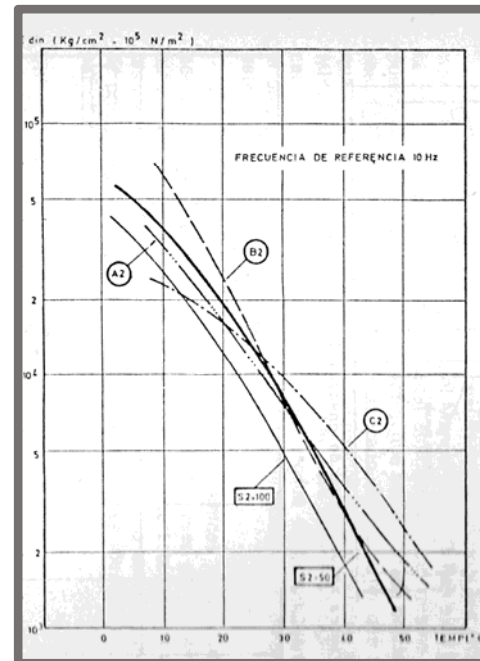
Tosticarelli et al.
IMAE, Argentina

Antecedentes (1985)

Comisión
Permanente
del Asfalto

VIGESIMA TERCERA
REUNION DEL ASFALTO

1985



DETERMINACION DEL MODULO DINAMICO (STIFFNESS) DE MEZCLAS ASFALTICAS UTILIZADAS EN PAVIMENTOS DE LA REGION LITORAL

Por los Ings. FERNANDO MARTINEZ *, SILVIA ANGELONE *
y JORGE R. TOSTICARELLI *

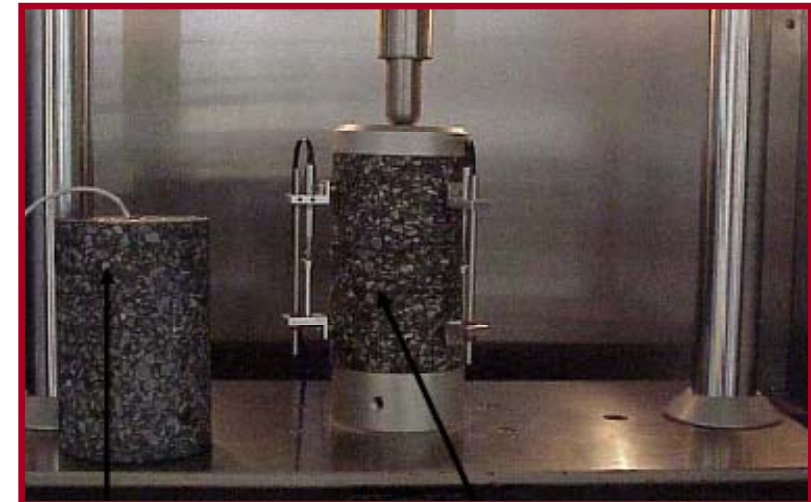
RESUMEN

Se destaca la importancia del conocimiento de las características dinámicas de los distintos materiales que componen las estructuras viales y en particular las mezclas asfálticas con el objeto de una correcta evaluación del comportamiento en servicio como así también para la definición de los parámetros de entrada en los modernos métodos de diseño de pavimentos y programas de análisis estructural por computación.

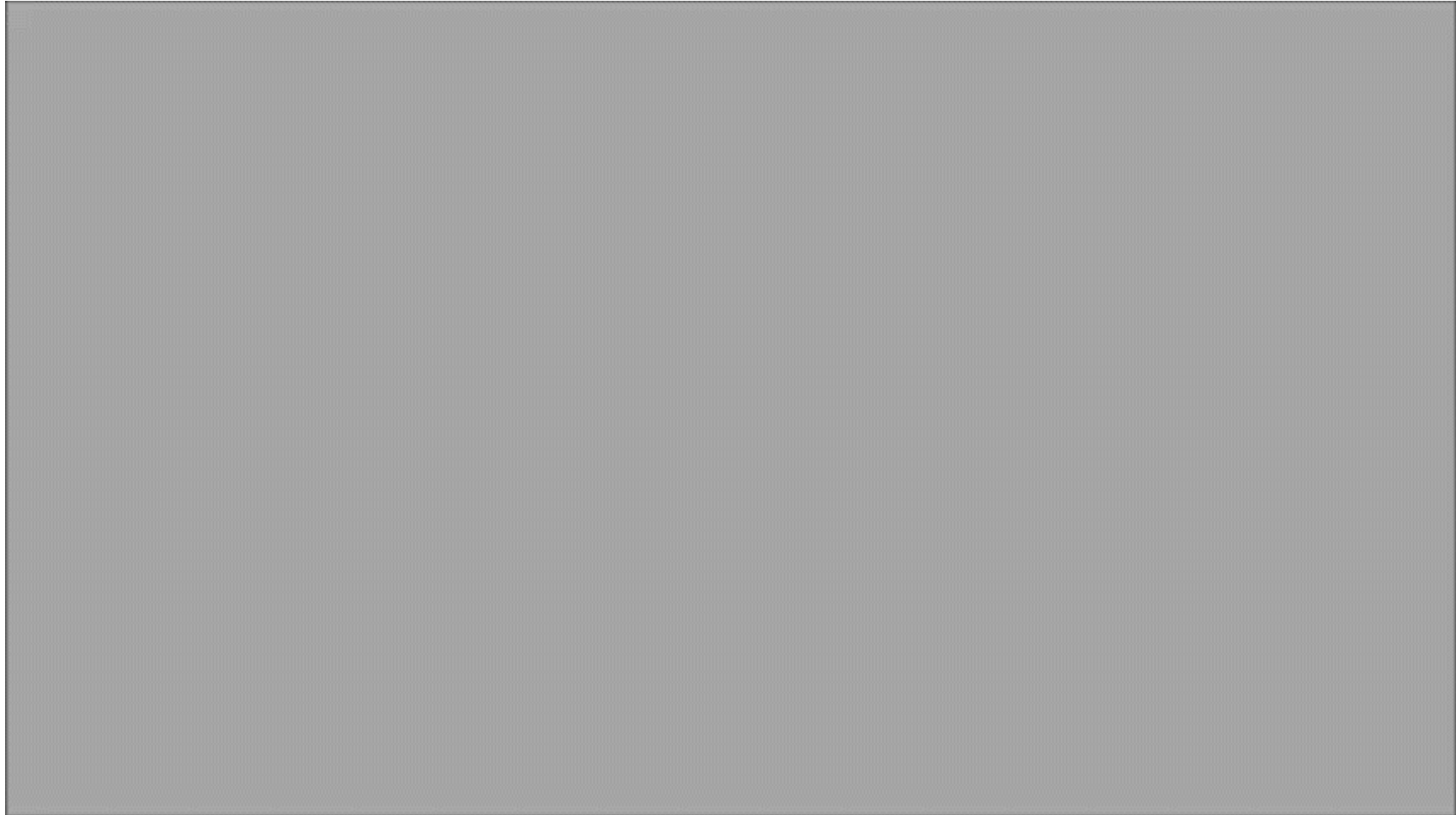
Martínez, Angelone y Tosticarelli
IMAE, Argentina

El Módulo Dinámico | E^* |

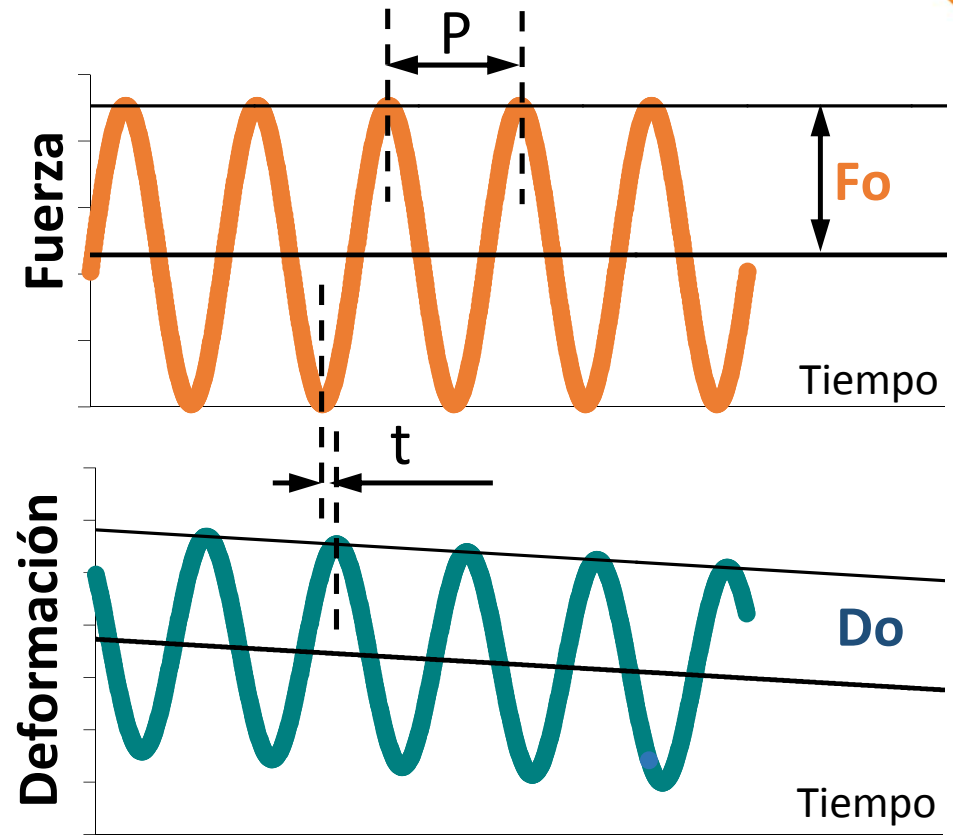
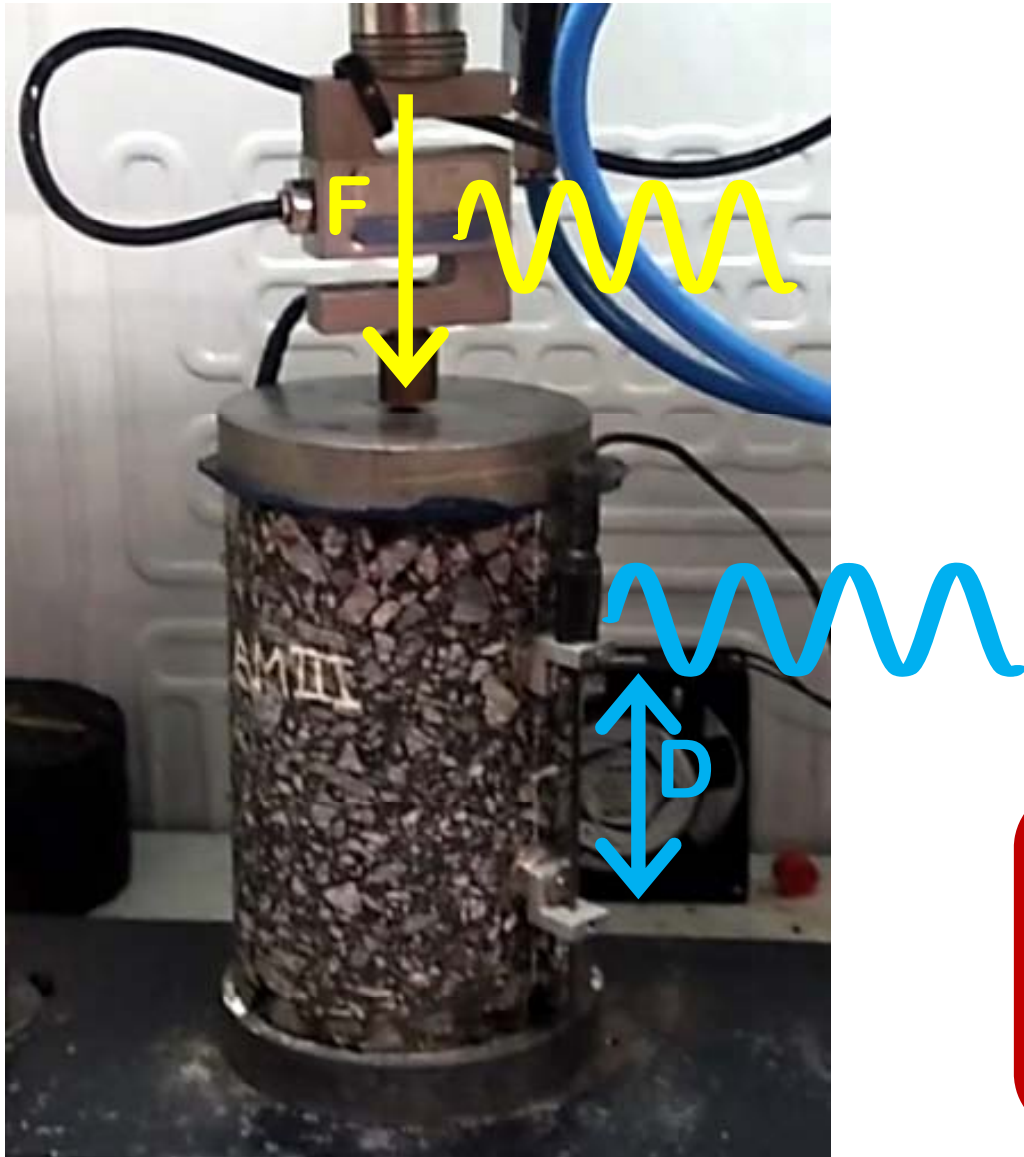
- Típicamente en condiciones de compresión uniaxial
- Probetas cilíndricas esbeltas con relación $h/D = 1,5$ a 2
- Obtenidas en laboratorio mediante calado de testigos compactados en el Compactador Giratorio
- **Aplicación de fuerza verticales de variación sinusoidal a distintas frecuencias y temperaturas**



El ensayo de $|E^*|$



El Módulo Dinámico $|E^*|$



$$|E^*| = \frac{\sigma_0}{\epsilon_0} = \frac{F_0/A}{D_0/L}$$

$$\phi = \frac{t}{P} \cdot 360^\circ$$

Determinación Experimental |E*|

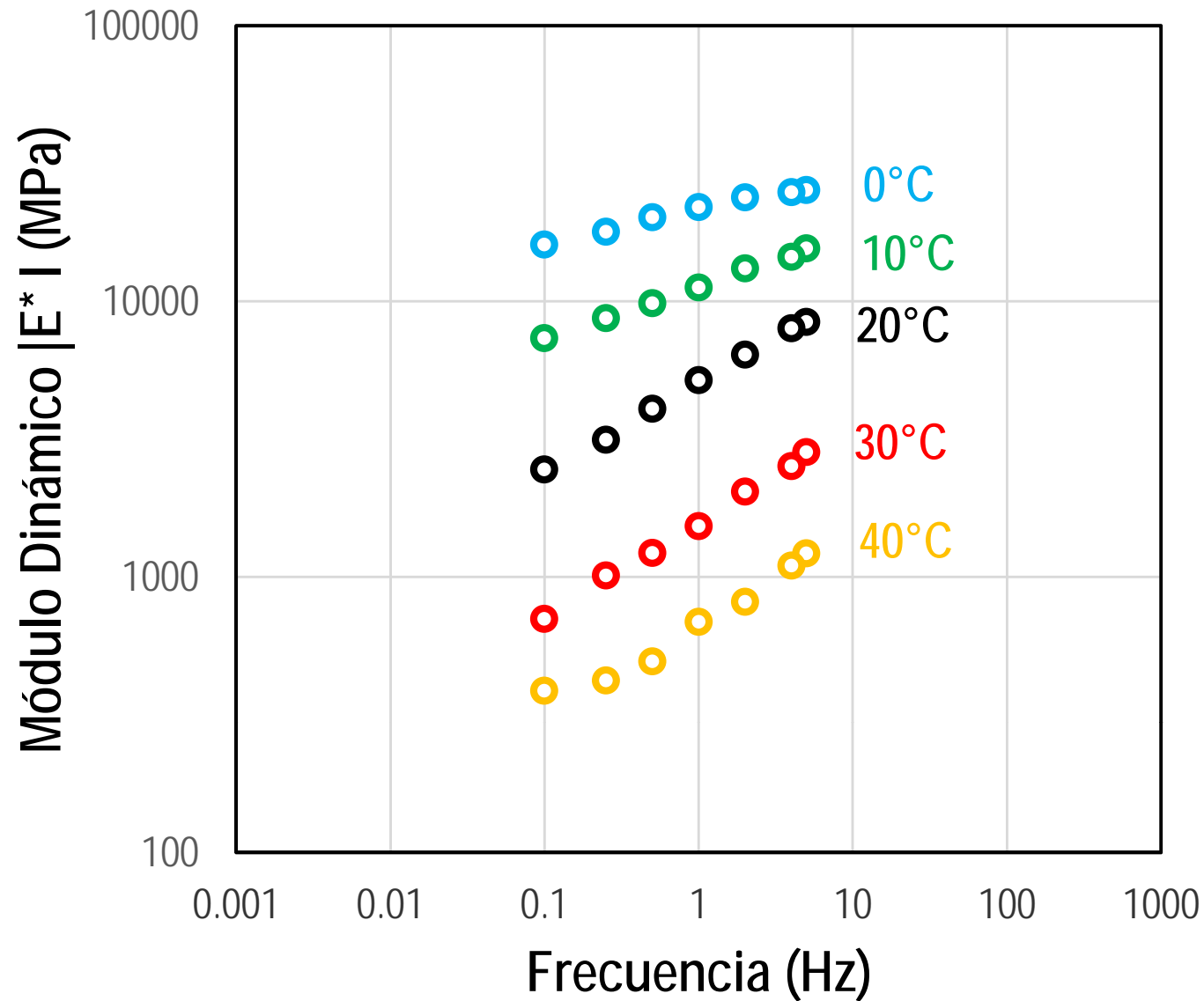
AASHTO T 342 (2011)
~~AASHTO TP 62 (2007)~~



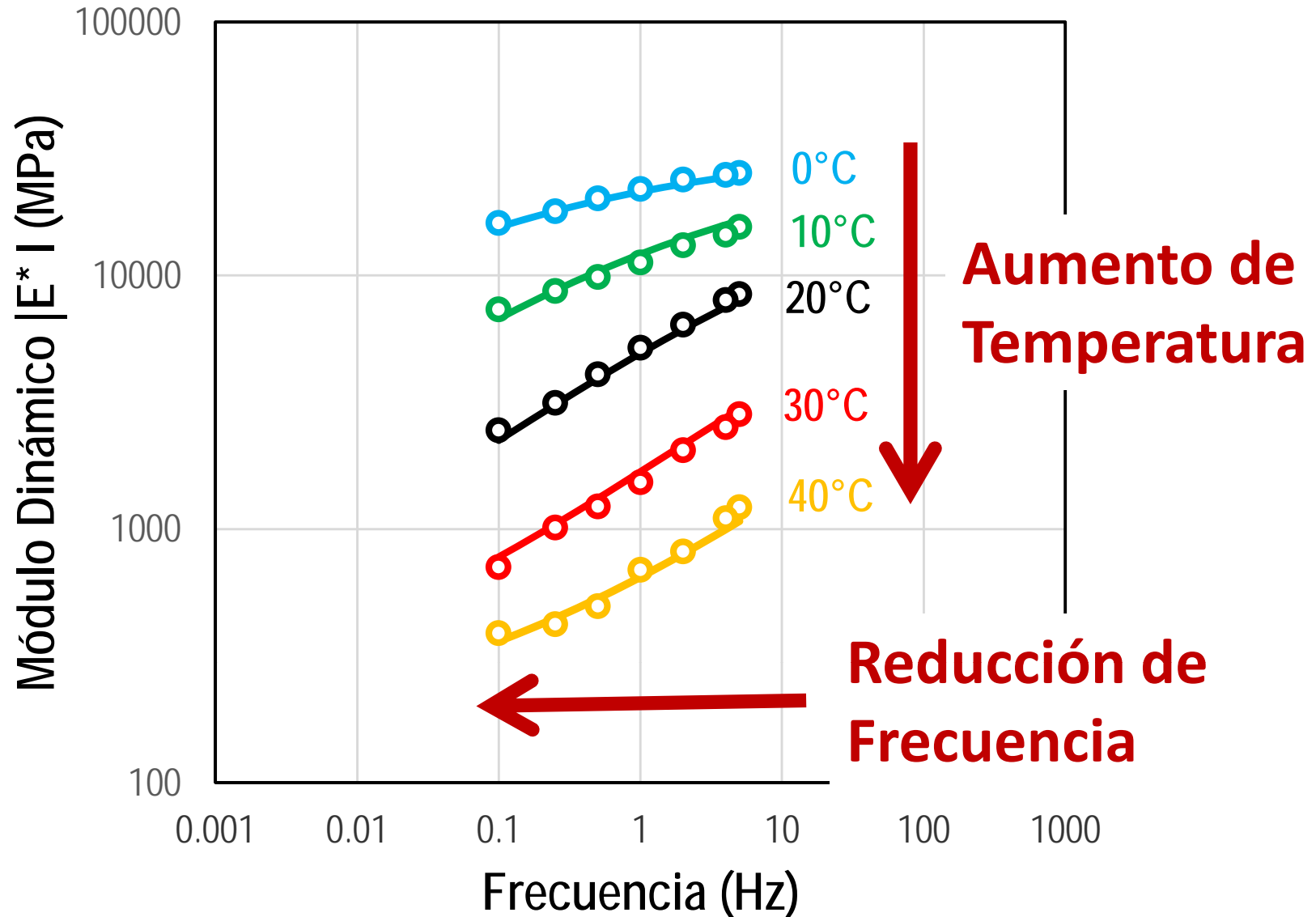
Distintas temperaturas
y frecuencias
Frecuencias: 5, 4, 2, 1,
0.5, 0.25 y 0.1 Hz
Temperaturas: 0, 10,
20, 30 y 40 °C



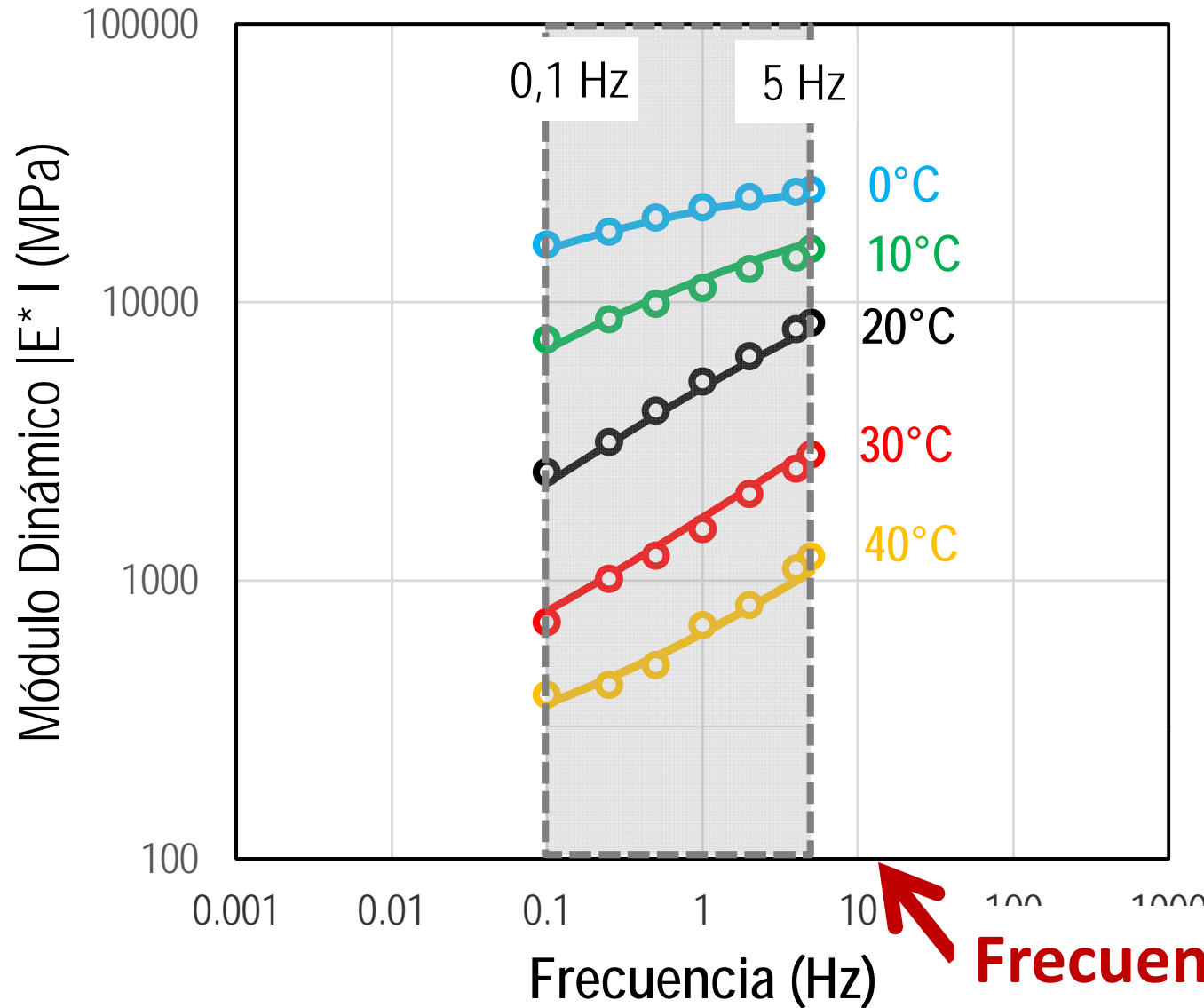
Resultados | E^* |



Resultados | E^* |

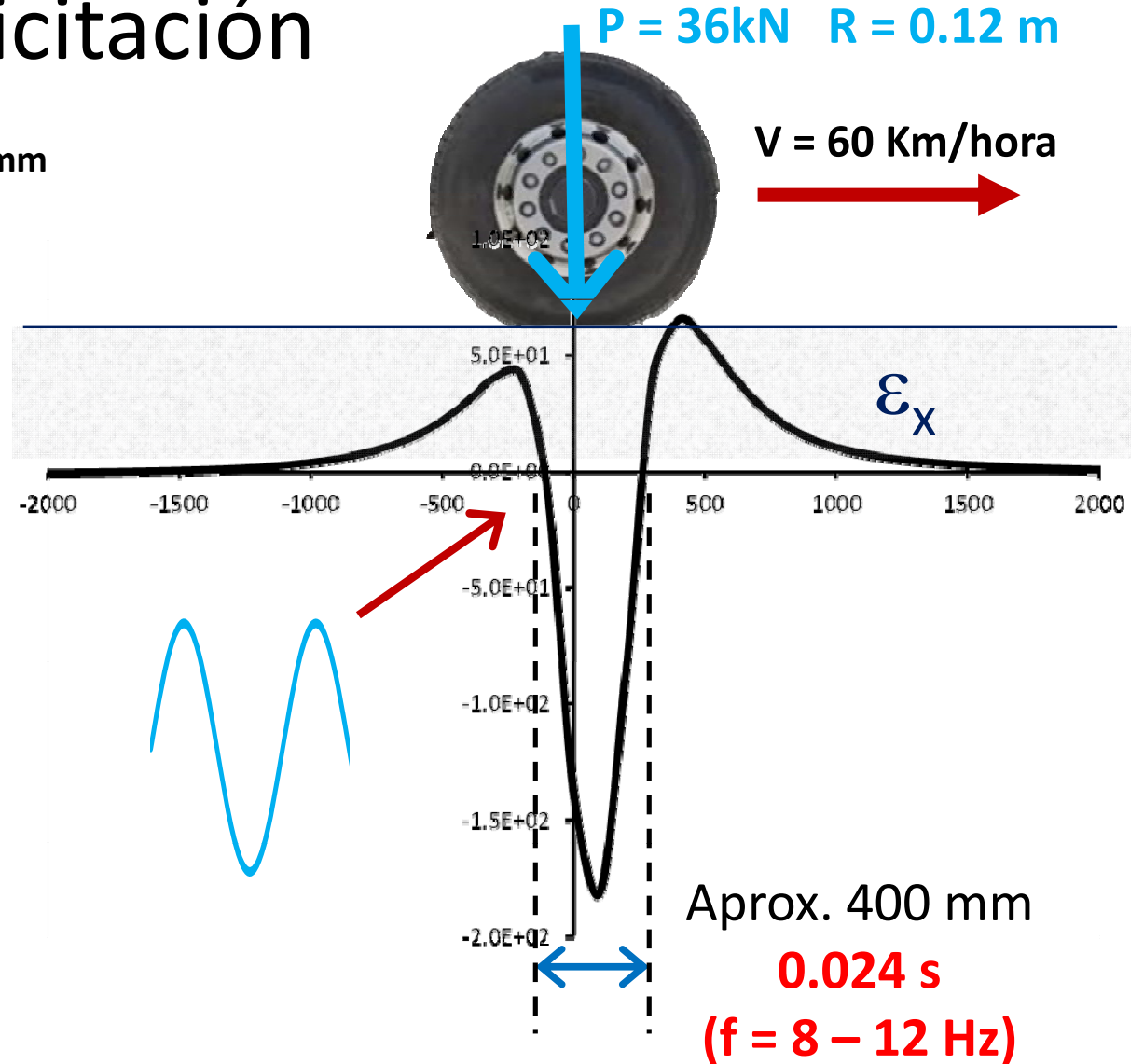


Rango limitado de análisis

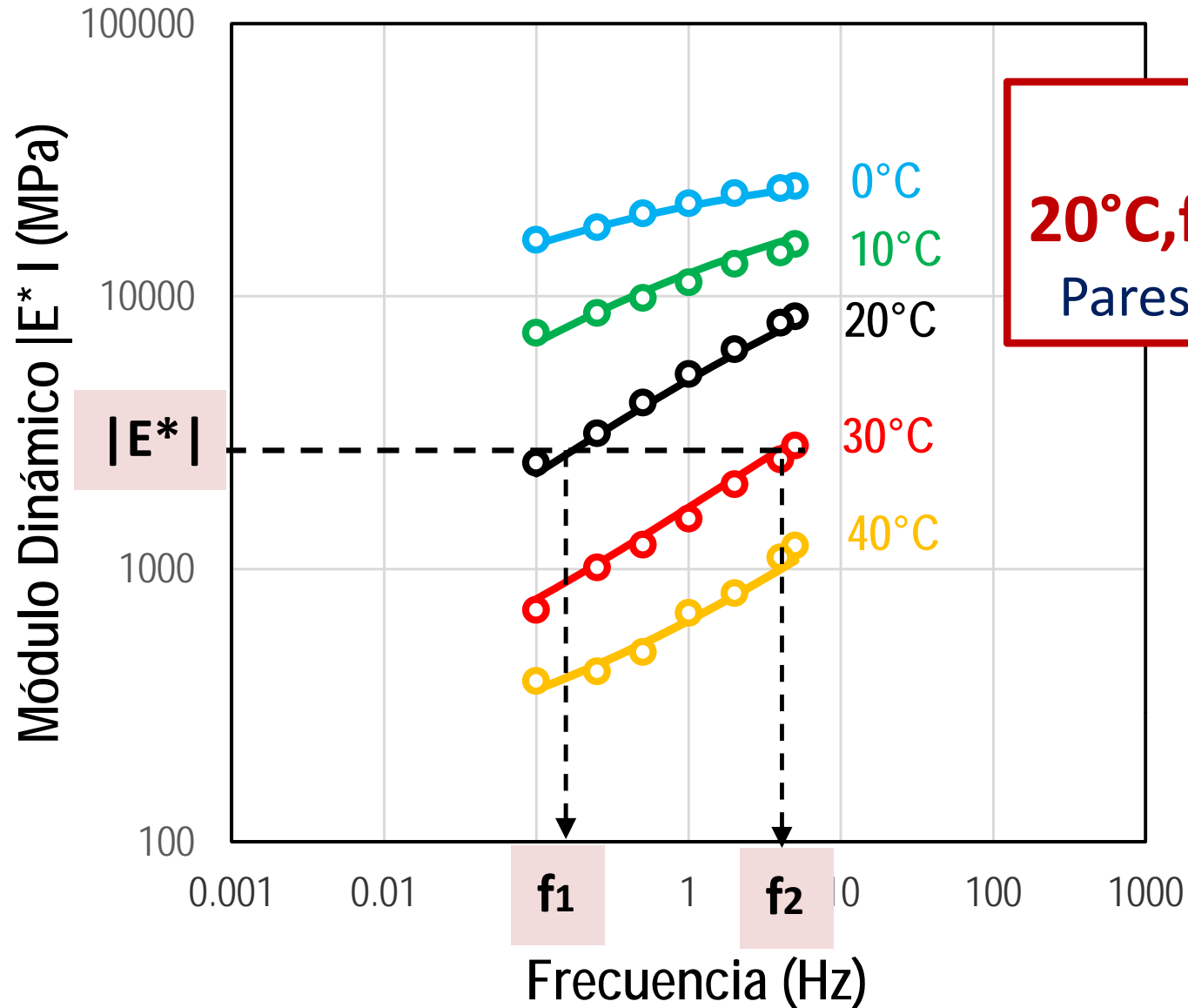


Frecuencias de interés

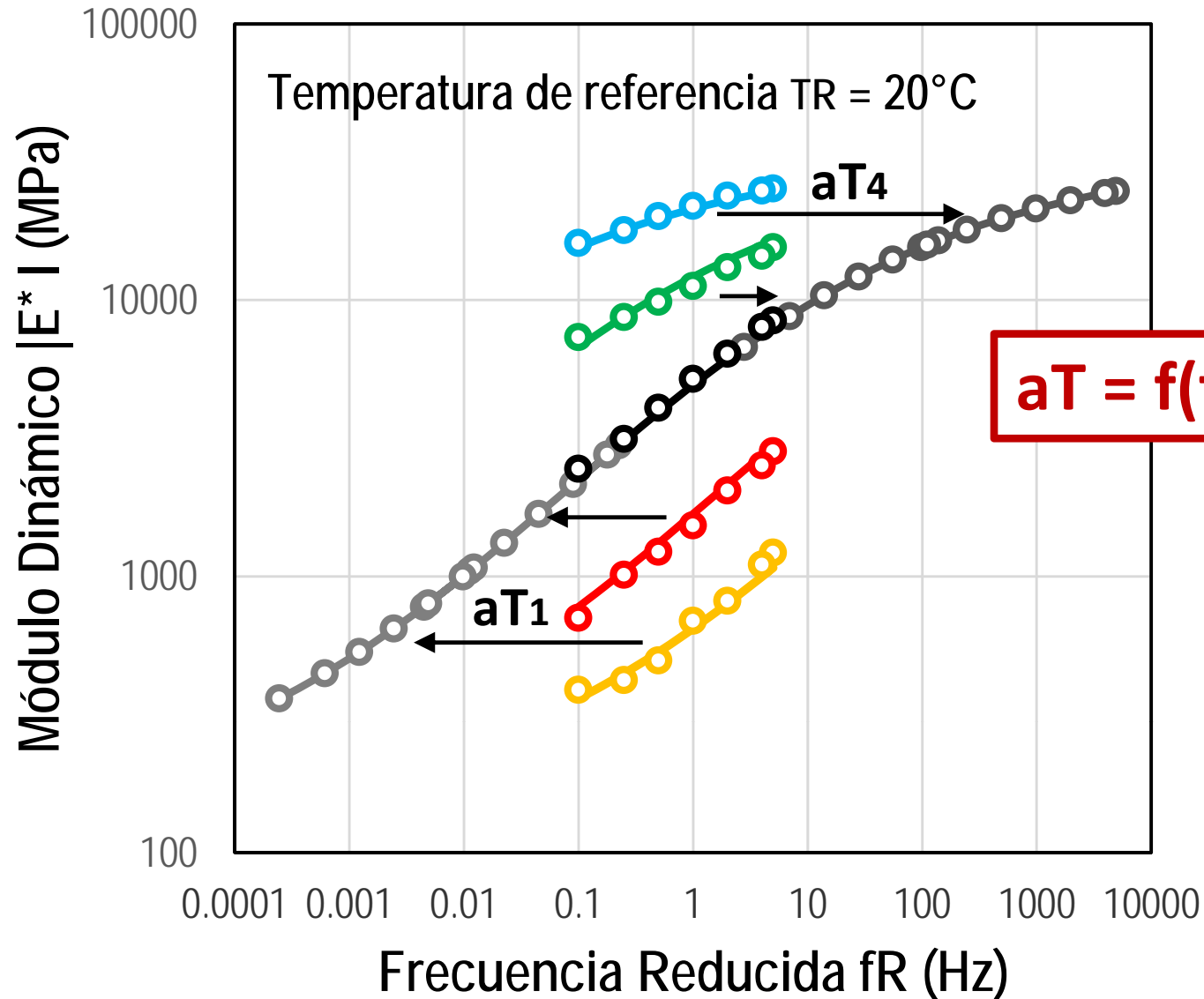
Frecuencias de sollicitación



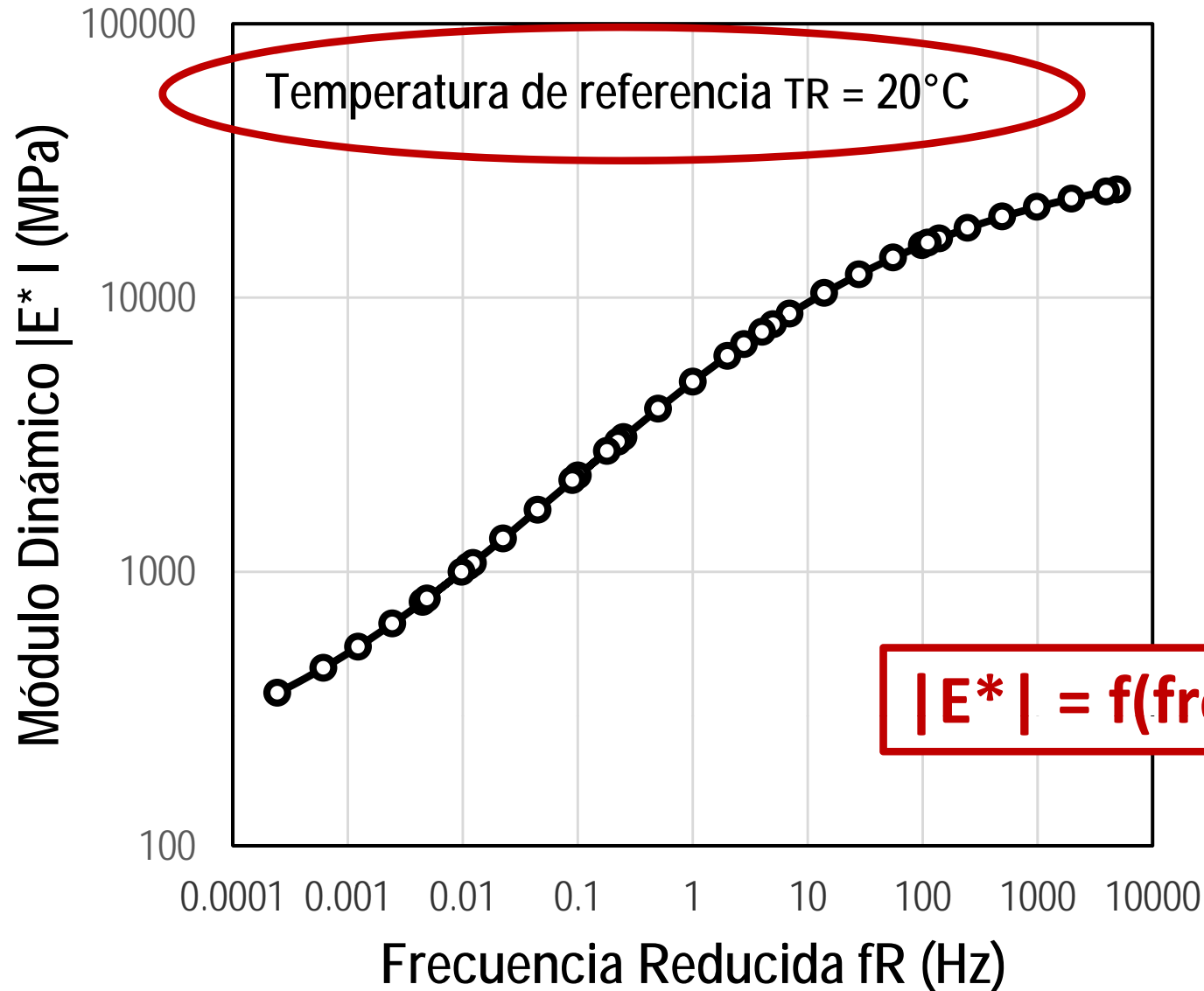
Equivalencia Frecuencia-Temperatura



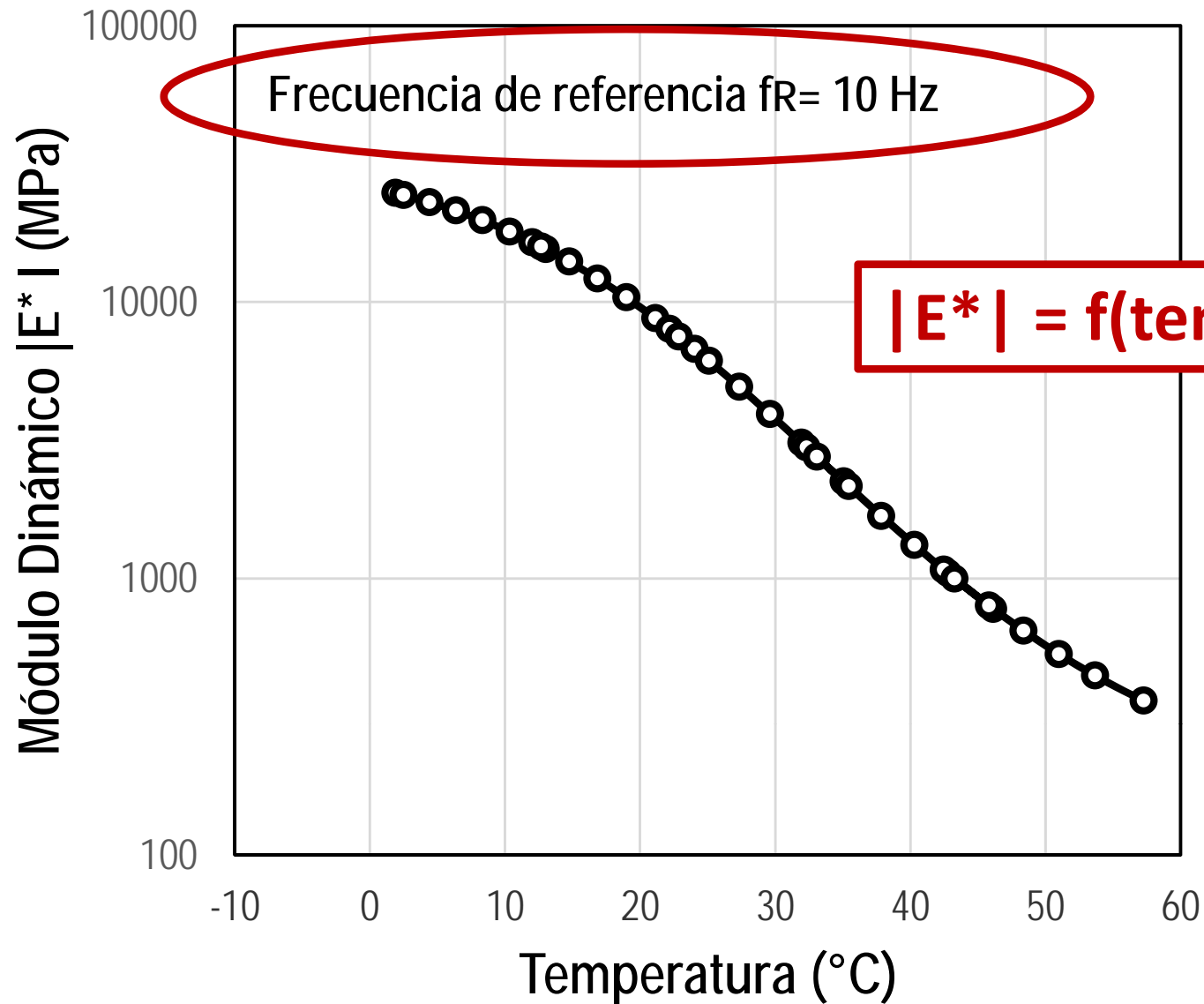
Factor de desplazamiento (aT)



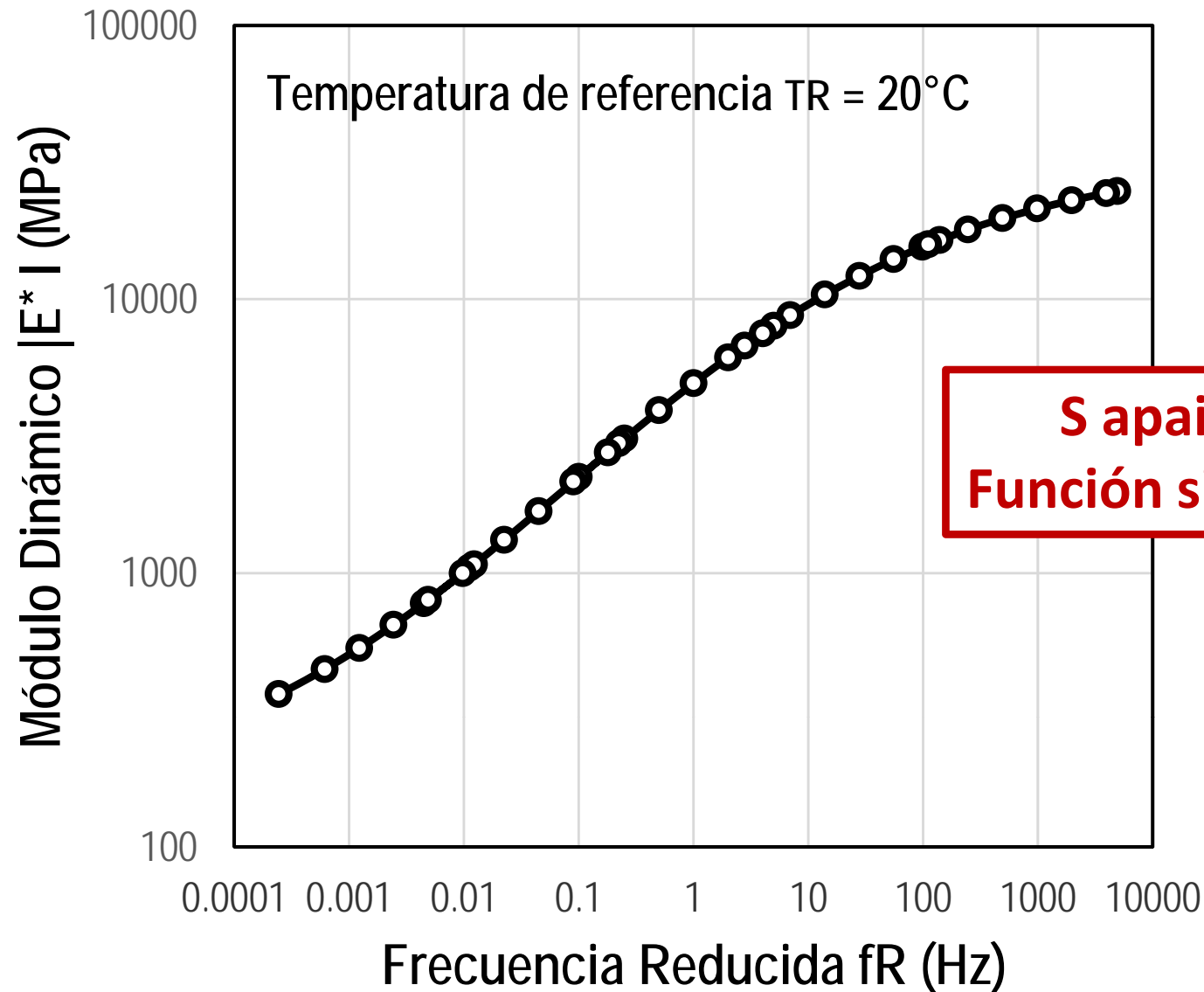
Curva Maestra (Isotherma)



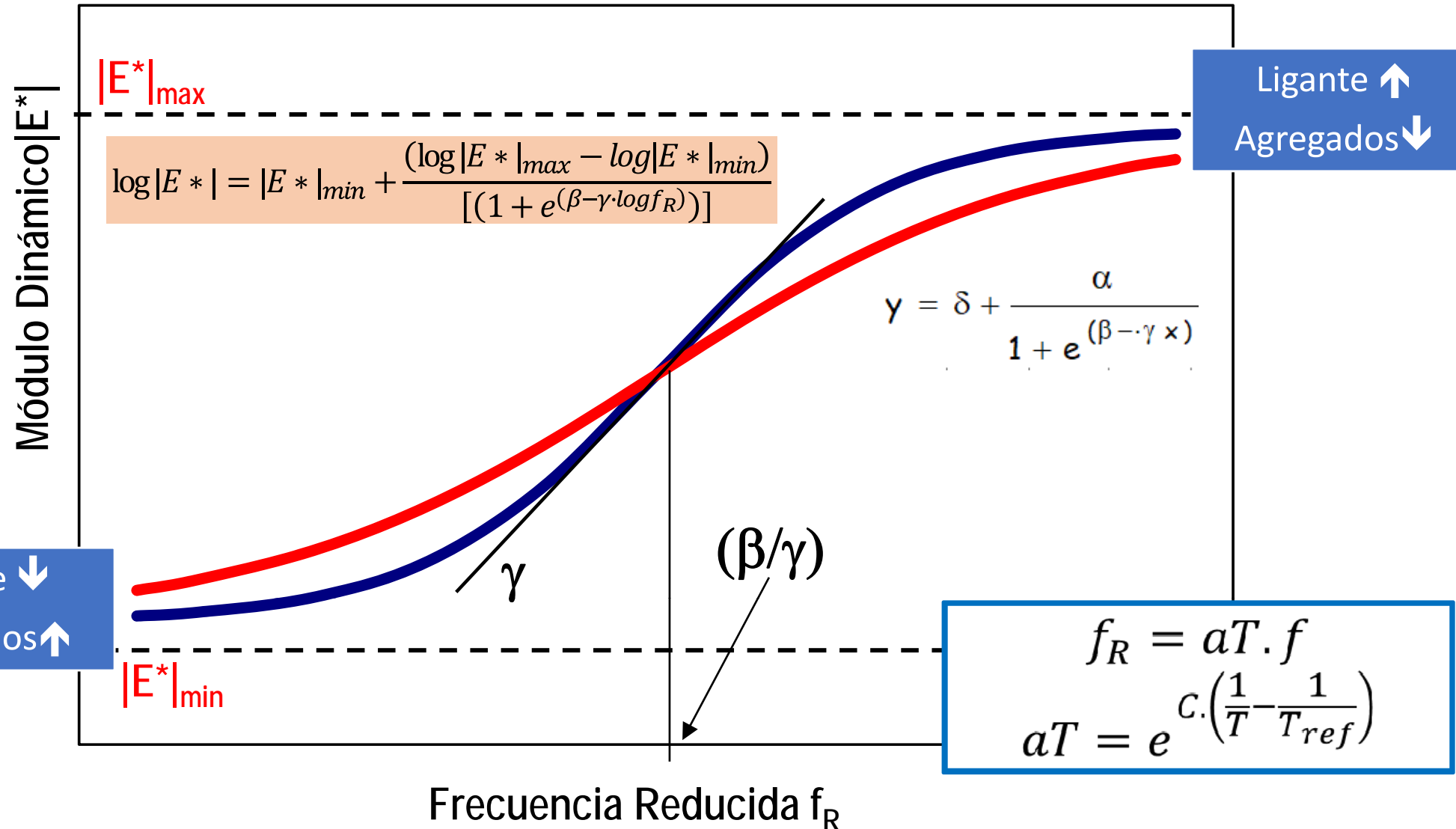
Curva Maestra (Isócrona)



Curva Maestra (Isoterma)



El Modelo Sigmoidal



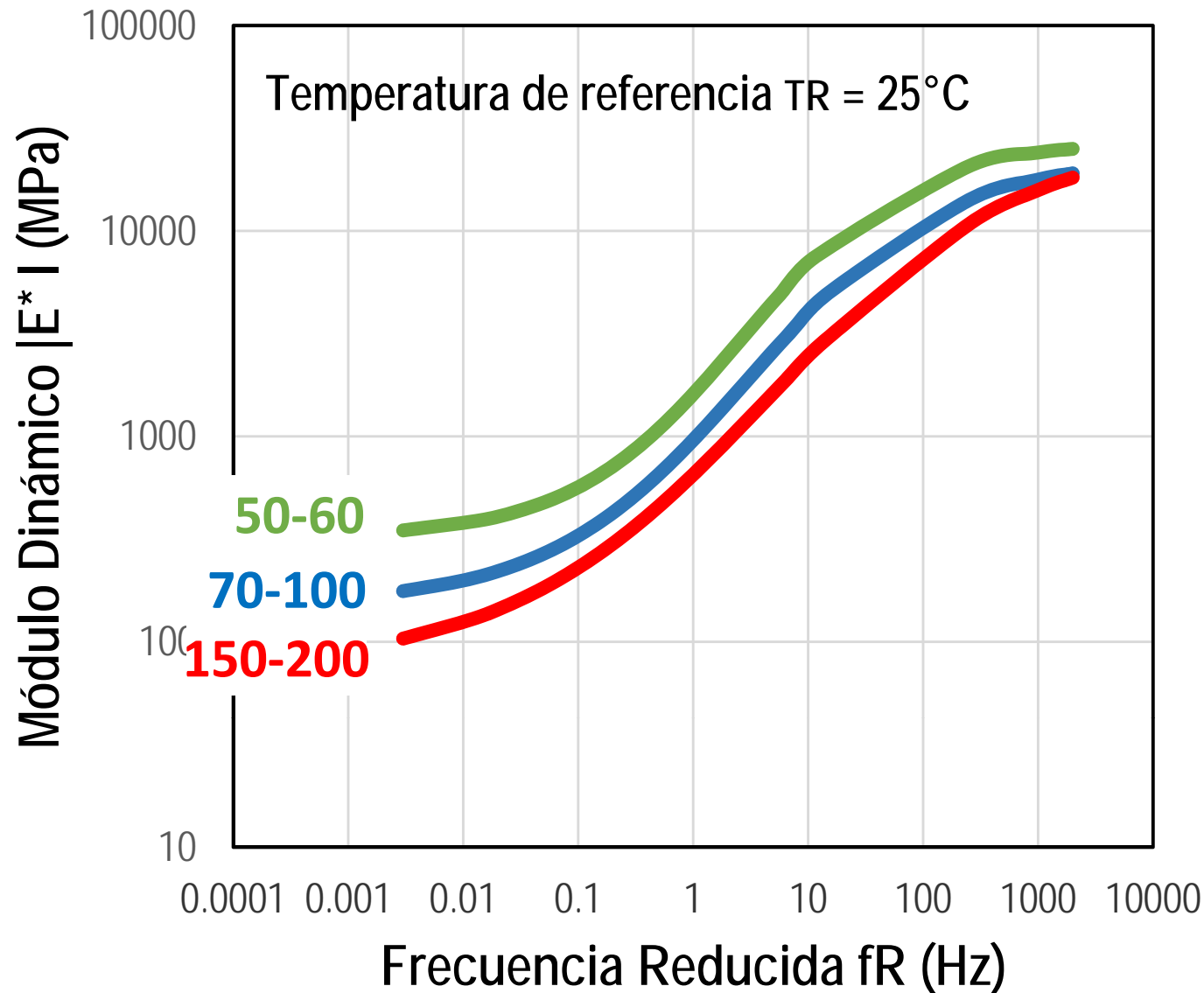
Mezclas típicas de Argentina

- ✓ Biblioteca de resultados experimentales que puedan ser aplicados al diseño estructural de pavimentos flexibles.
- ✓ Módulos dinámicos de mezclas asfálticas diferentes a distintas frecuencias y temperaturas.
- ✓ 16 mezclas asfálticas distintas variando desde concretos asfálticos densos convencionales a algunas mezclas especiales entre las que se incluyen bases asfálticas de alto módulo, mezclas drenantes y del tipo SMA.

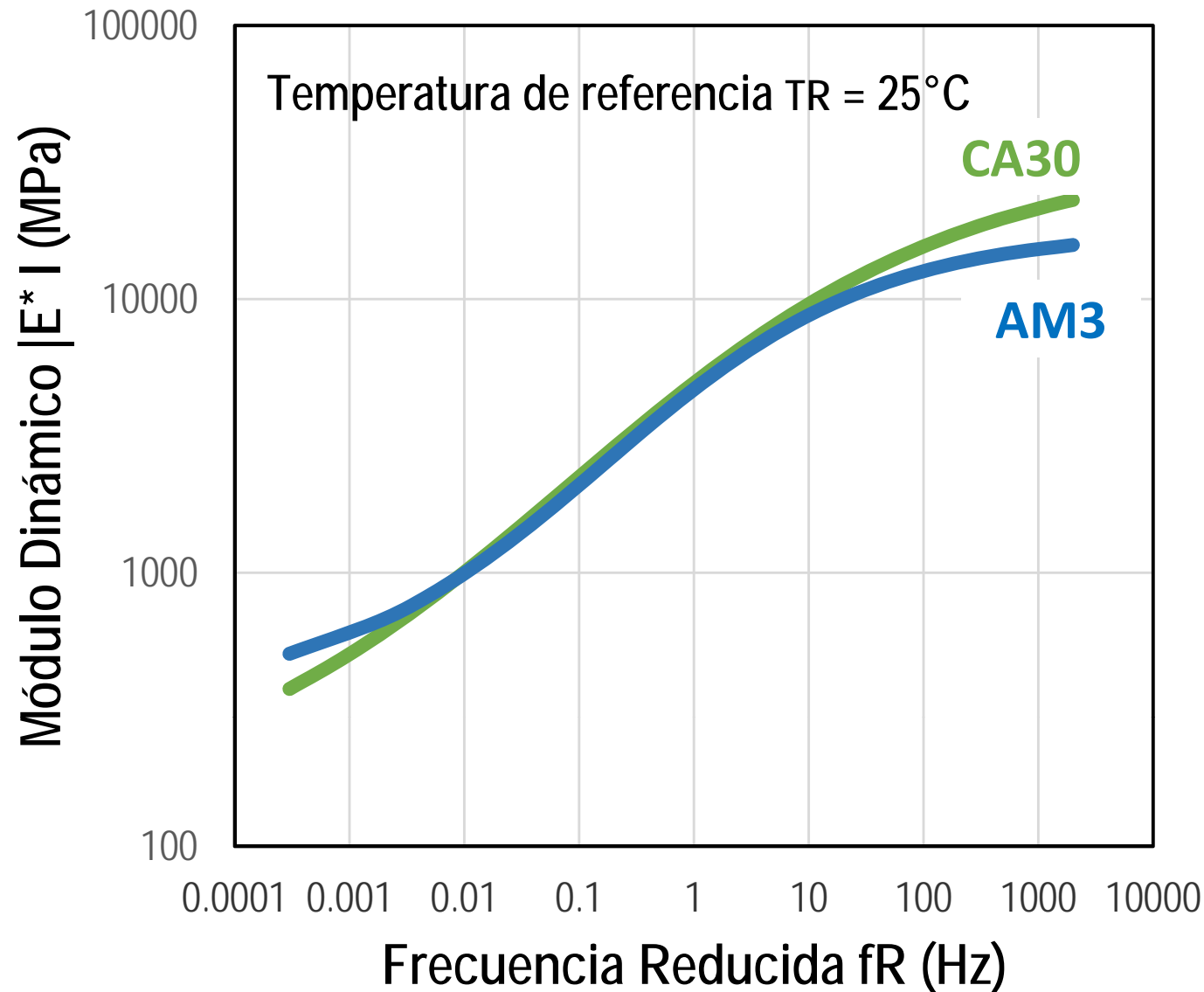
	CAC1	CAC2	CAC3
Vb (%)	12.4	12.5	12.5
Va (%)	4.7	4.5	4.1
Vg (%)	82.9	83.0	83.4
D(g/cm ³)	2.376	2.398	2.413
Tmax(mm)	19	19	19
Ligante	50-60	70-100	150-200

	CAC1	CAC2	CAC3
E* _{max} (MPa)	27302	22766	30199
E* _{min} (MPa)	322	152	74
β	0.567	0.541	0.567
γ	-1.361	-1.163	-0.893
C	12596.6	14481.2	18892.9
R ²	99.2%	98.6%	98.8%

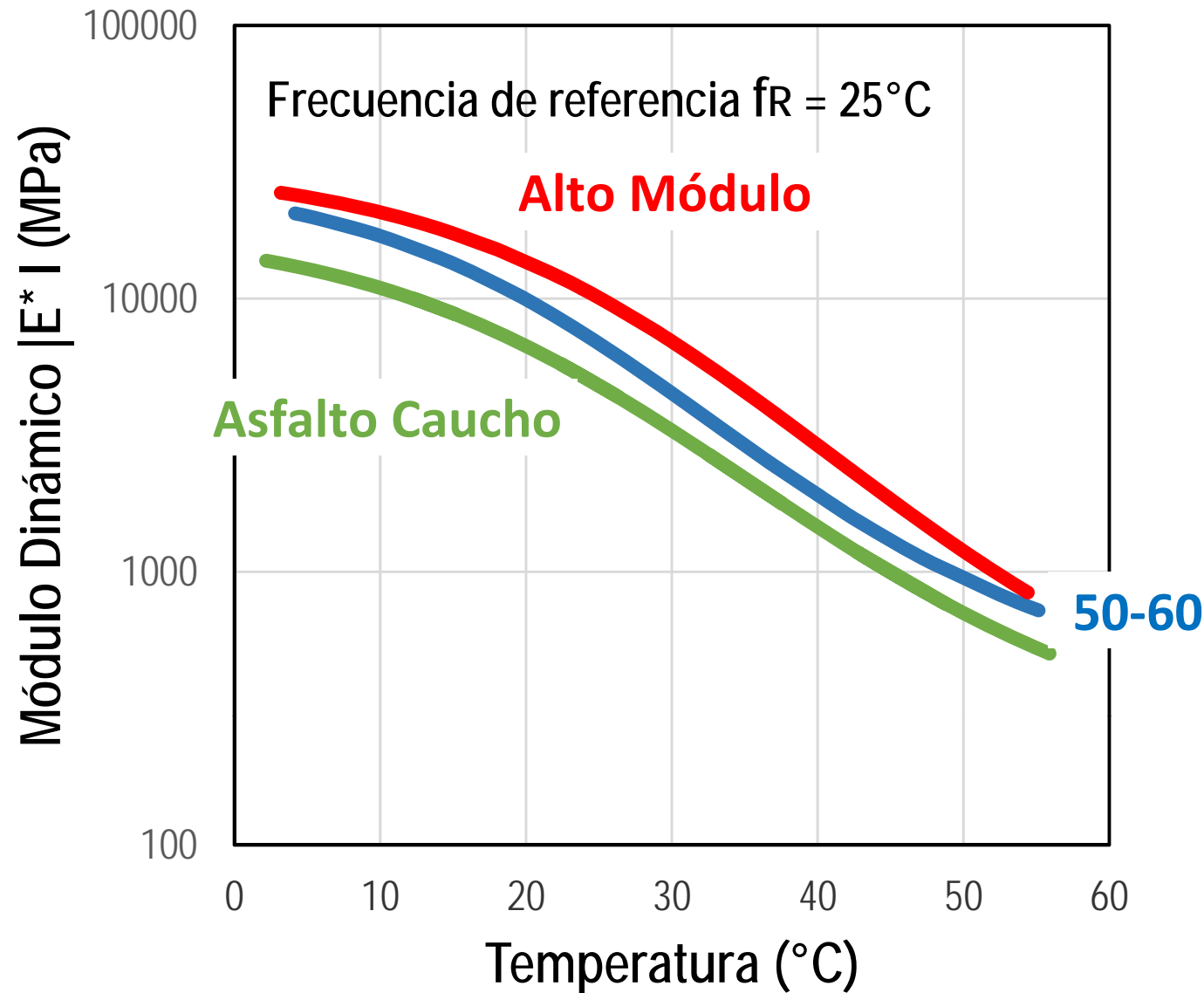
Influencia del tipo de asfalto



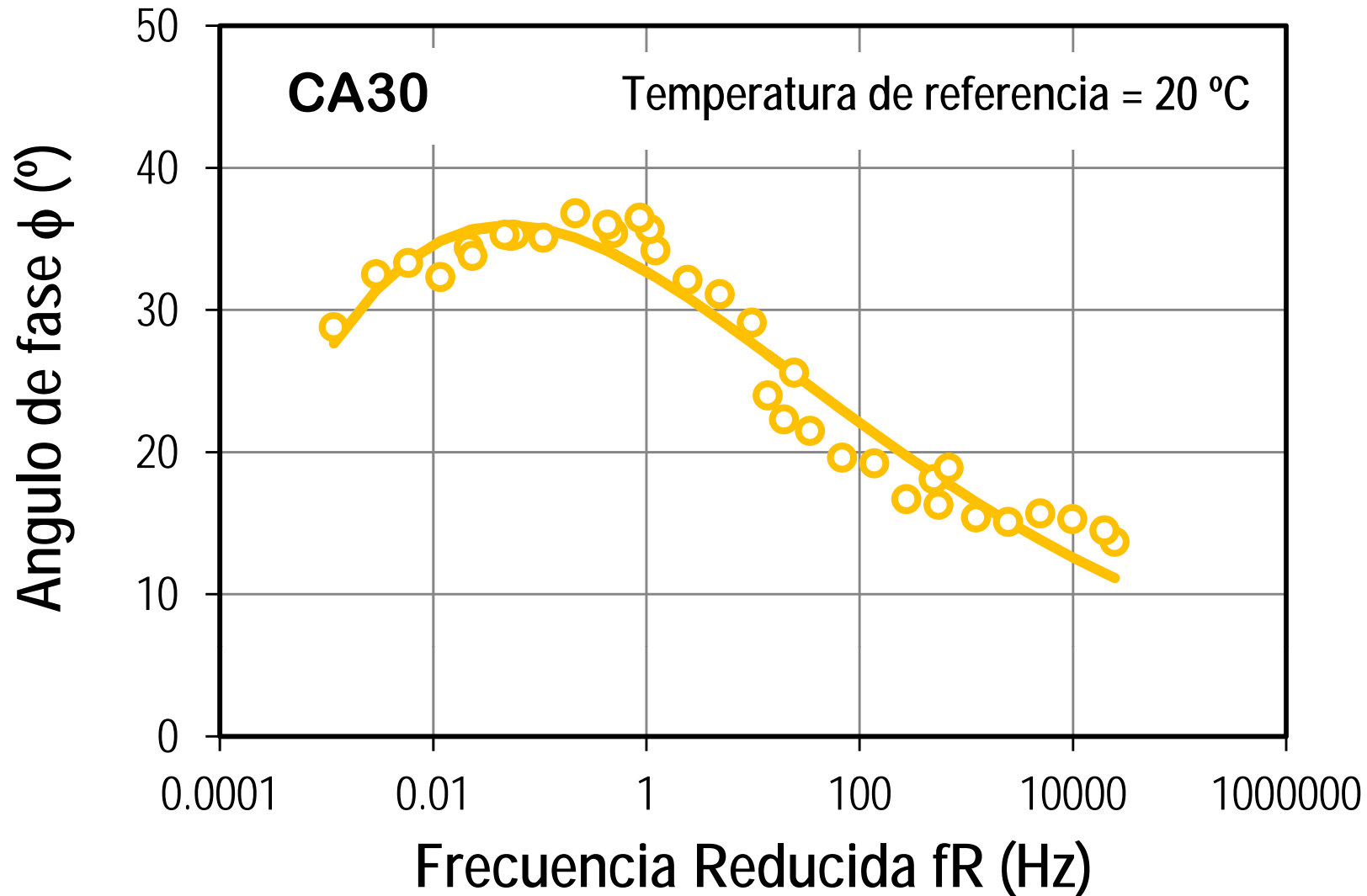
Convencional vs. Modificado



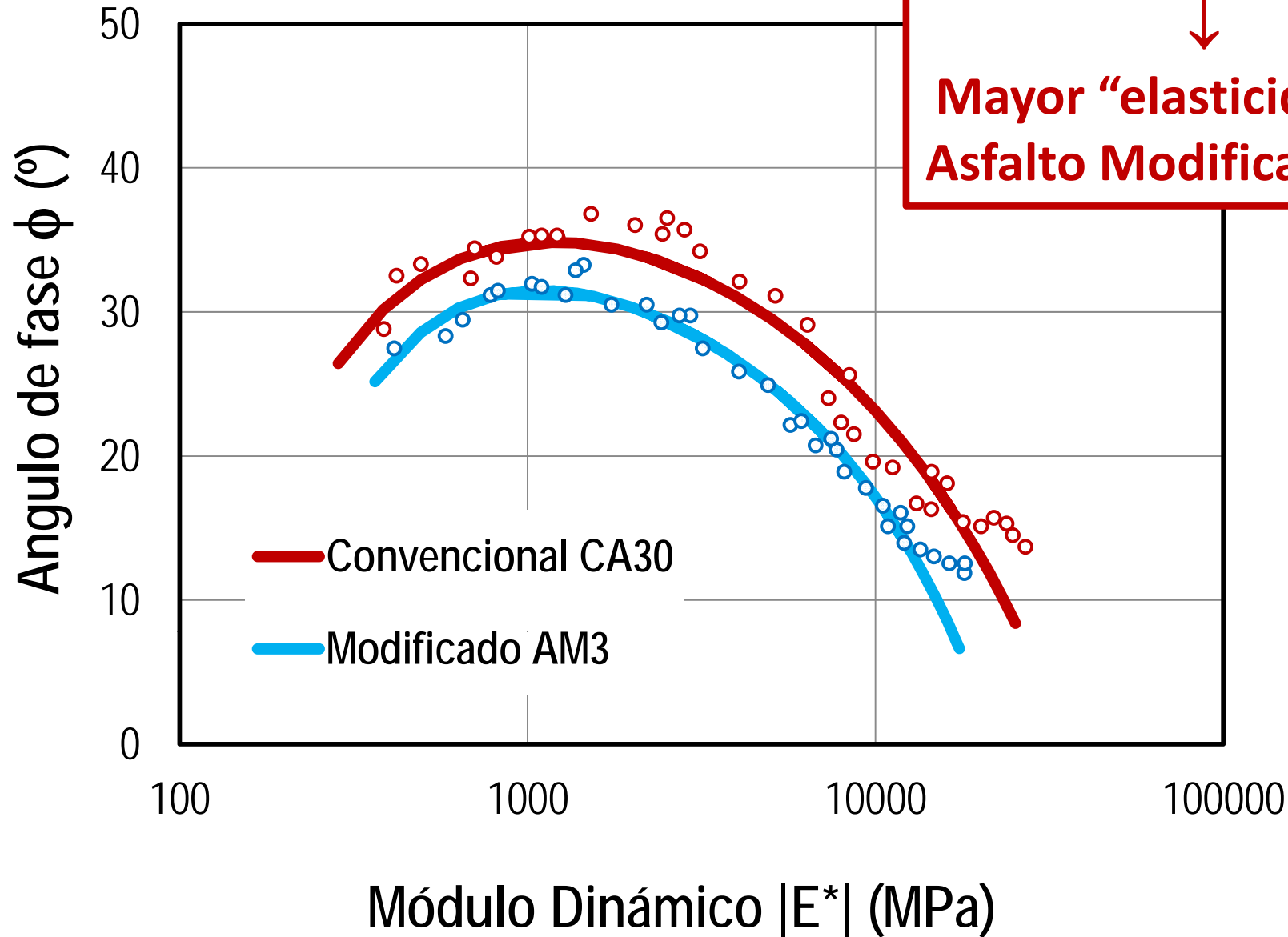
Otras mezclas



Curva Maestra del ángulo de fase ϕ



Caracterización reológica



A igual $|E^*|$, menor ϕ

↓

Mayor "elasticidad" del Asfalto Modificado AM3

Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)

- Programa SHRP y SuperPave para MA
- Ensayos fundamentales de desempeño que complementan el diseño volumétrico
- Máquina especial para valorar
 - Rigidez de MA ($|E^*|$)
 - Resistencia al ahuellamiento (Fn)



©Pavetest



©GTS



©Controls



Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT)

Master Curves for Structural Design with the AMPT



Step 1 Prepare Specimens

- AASHTO PP60
- 2 or 3 replicates needed
- Expected In-situ air void content



Step 2 Perform Dynamic Modulus Tests

- AASHTO PP61 and TP79
- 4 °C
- 20 °C
- High temperature based on binder grade



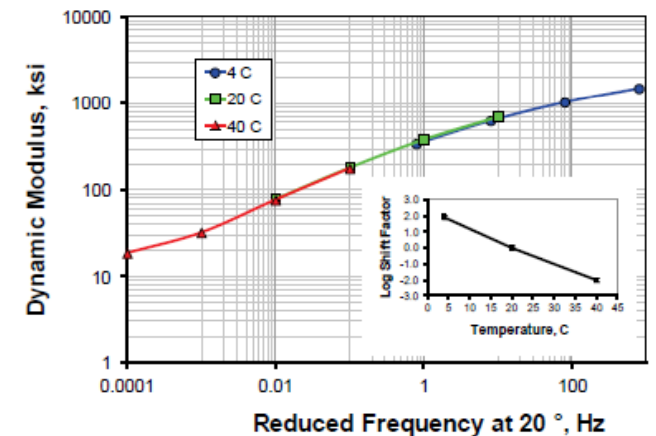
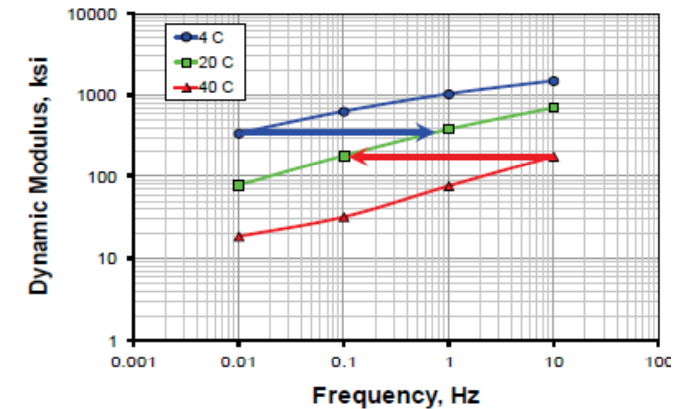
Step 3 Generate Master Curve with MasterSolver

- AASHTO PP61
- Input data
- Fit master curve
- Review goodness of fit



Step 4 Input Master Curve Data for Design

- AASHTOware[®] Pavement ME Design moduli in MEPDG Input Sheet of MasterSolver



Ref: Asphalt Mixture Performance Tester (AMPT), TechBrief, FHWA-HIF-13-005, 2013

AASHTO T 378 2017

Estimación de $|E^*|$

- La determinación experimental de E^* en las mezclas asfálticas requiere equipamiento especial y personal adecuadamente entrenado.
- En Argentina (e incluso en Sudamérica) hay pocos equipos adaptados para esta determinación experimental.
- Diferentes modelos disponibles para la predicción del módulo dinámico en la literatura

Estimación de $|E^*|$

Diferentes procedimientos (ecuaciones, modelos) para la predicción de $|E^*|$:

1. Heukelom y Klomp (Shell)
2. Uge, Gest, Gravois y Bonnaure (Procedimiento Shell)
3. Witczak original propuesto en la Guía de Diseño Empírico Mecanicista de Pavimentos AASHTO 2002

Modelos de regresión

4. Modelo de Hirsch

Modelo racional (ley de mezclas)

Consideran la rigidez o viscosidad del ligante asfáltico, los contenidos volumétricos de ligante, agregados y vacíos, granulometría de agregados, frecuencias y temperaturas.

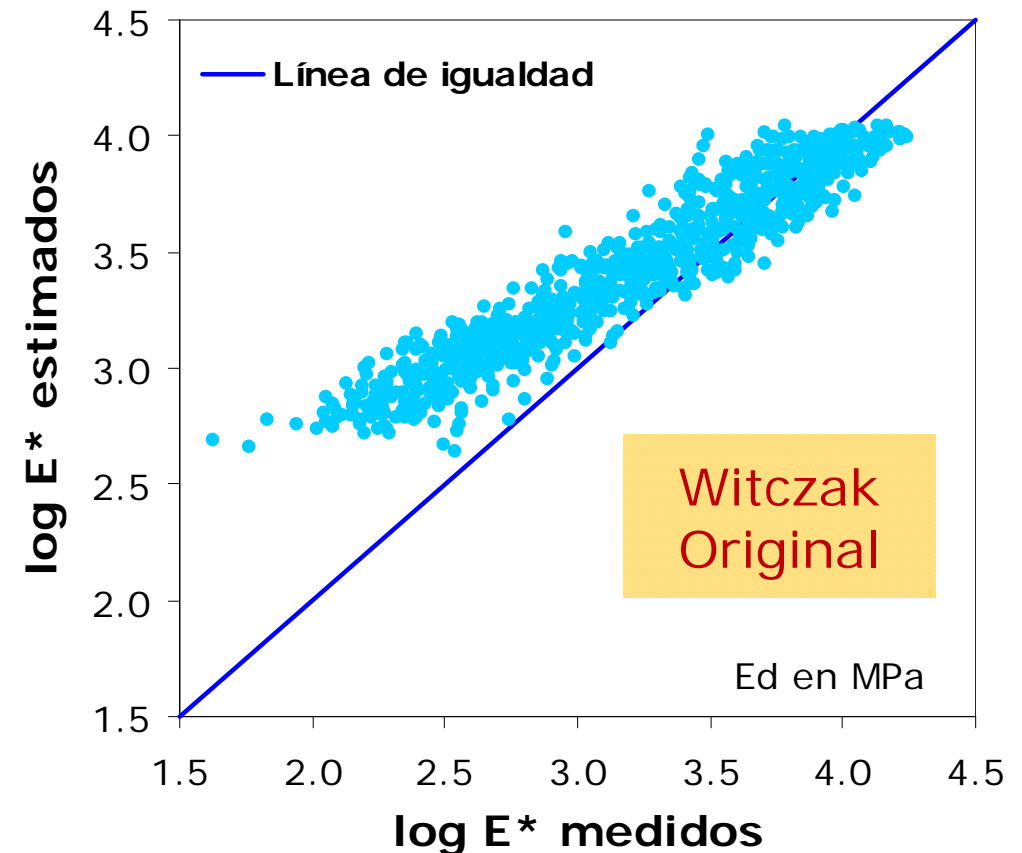
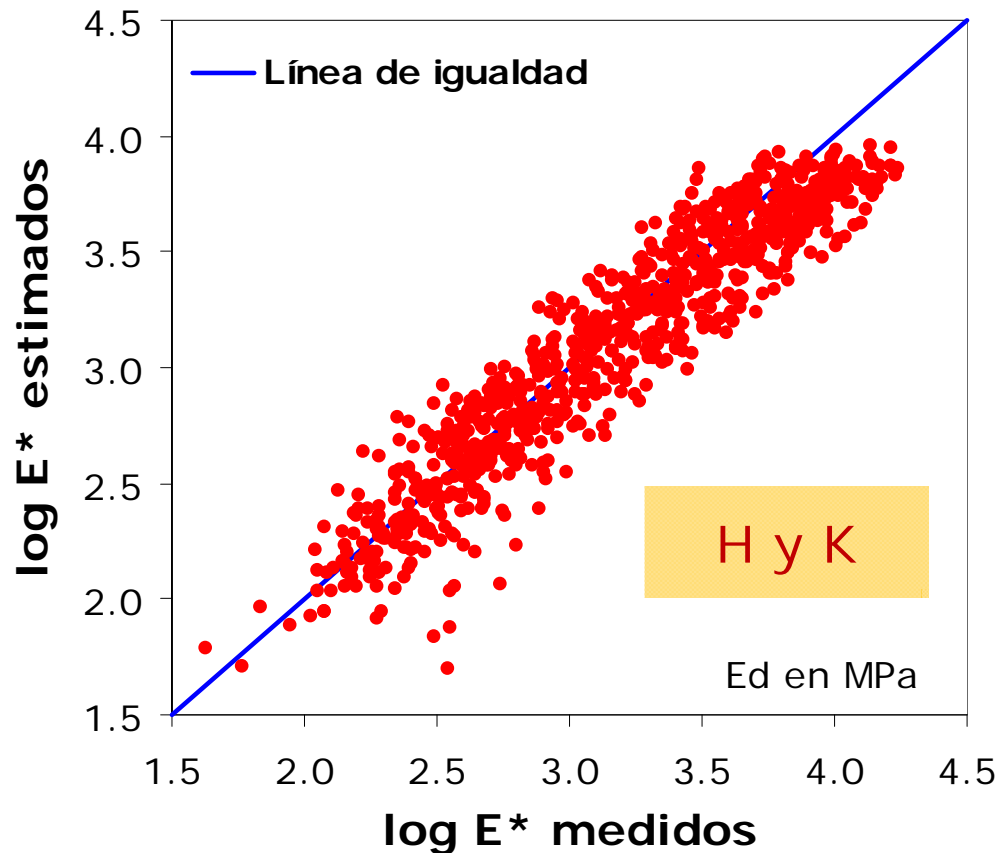
Estimación de $|E^*|$

- Probetas caladas en 17 secciones diferentes de pavimentos asfálticos recientemente construidos.
- 33 localizaciones donde fueron utilizados mezclas asfálticas de diferentes formulaciones tanto para la base y la carpeta (+42 diferentes mezclas utilizadas en la Argentina).
- En cada lugar, 6 muestras:
 - Dos para la determinación del módulo dinámico a 4 temperaturas y 5 frecuencias de sollicitación
 - Cuatro para la determinación de las propiedades volumétricas de cada mezcla, las propiedades del cemento asfáltico recuperado y granulometría de los agregados pétreos.



Conformación de una Base de Datos con la información de las mezclas consideradas (+1000 valores experimentales)

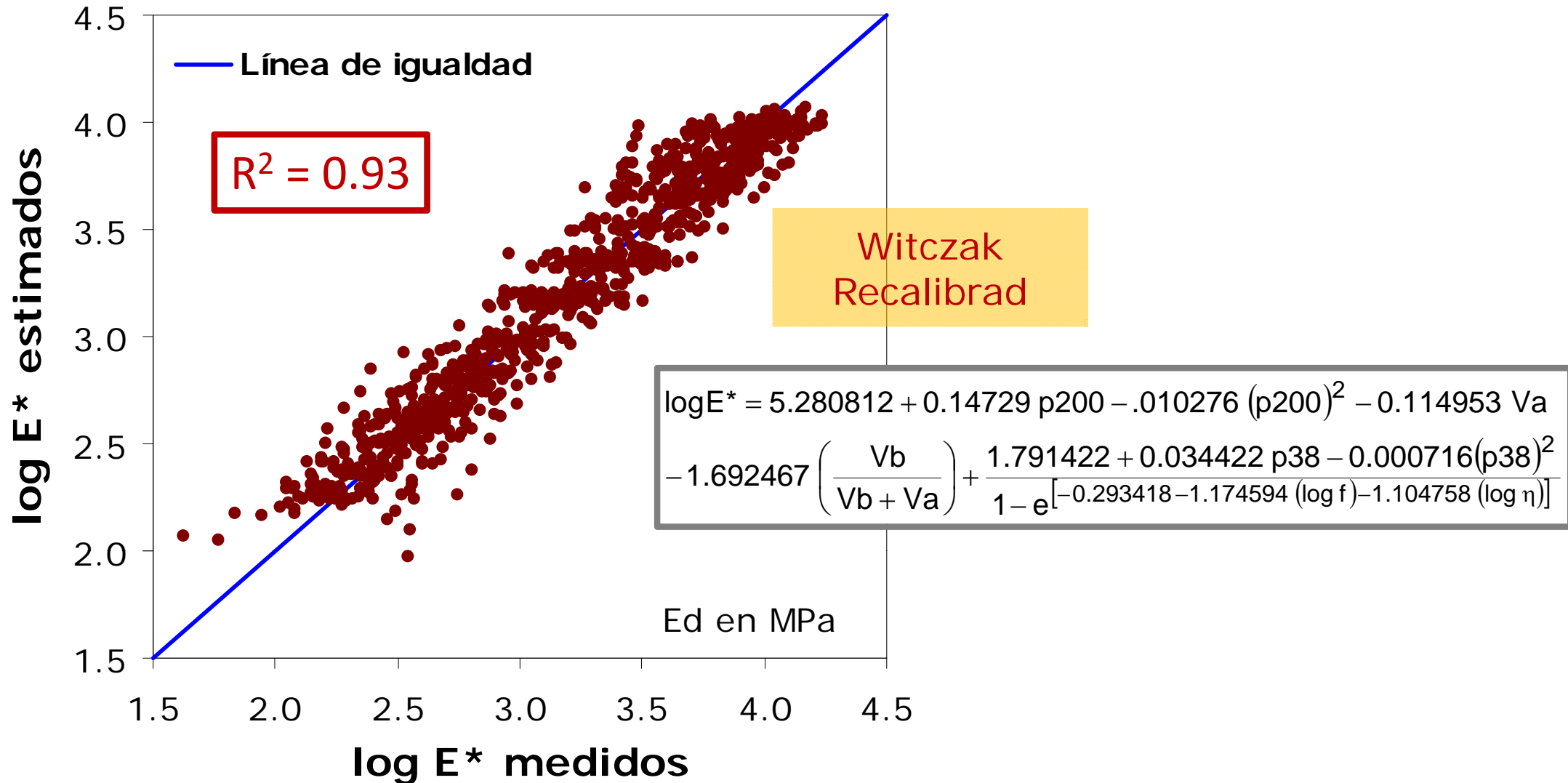
Estimación de $|E^*|$



En general, predicciones razonables.

Algunos modelos presentan un sesgo entre valores medidos y estimados → **Calibración a valores locales**

Recalibración del modelo (Regresión múltiple)



Otras configuraciones para $|E^*|$

Hemos visto que la determinación de $|E^*|$ requiere.....

- probetas cilíndricas esbeltas con relación $h/D = 1,5$ a 2
- obtenidas en laboratorio mediante calado de testigos compactados en el Compactador Giratorio

pero.....

- la técnica de compactación y el equipo son muy poco difundidos
- en general, no puede ser aplicado a la evaluación de mezclas asfálticas de pavimentos en servicio (espesor de testigos calados no llega a los 100 mm)



Hipótesis

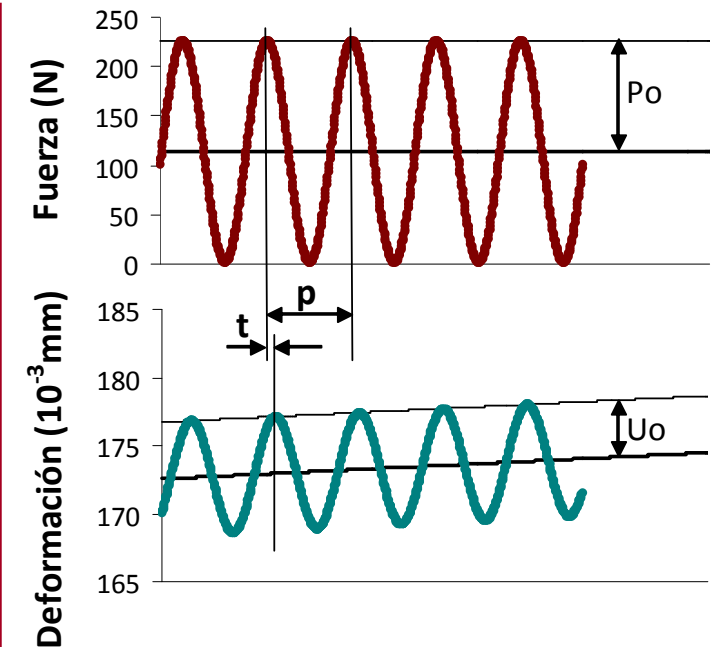
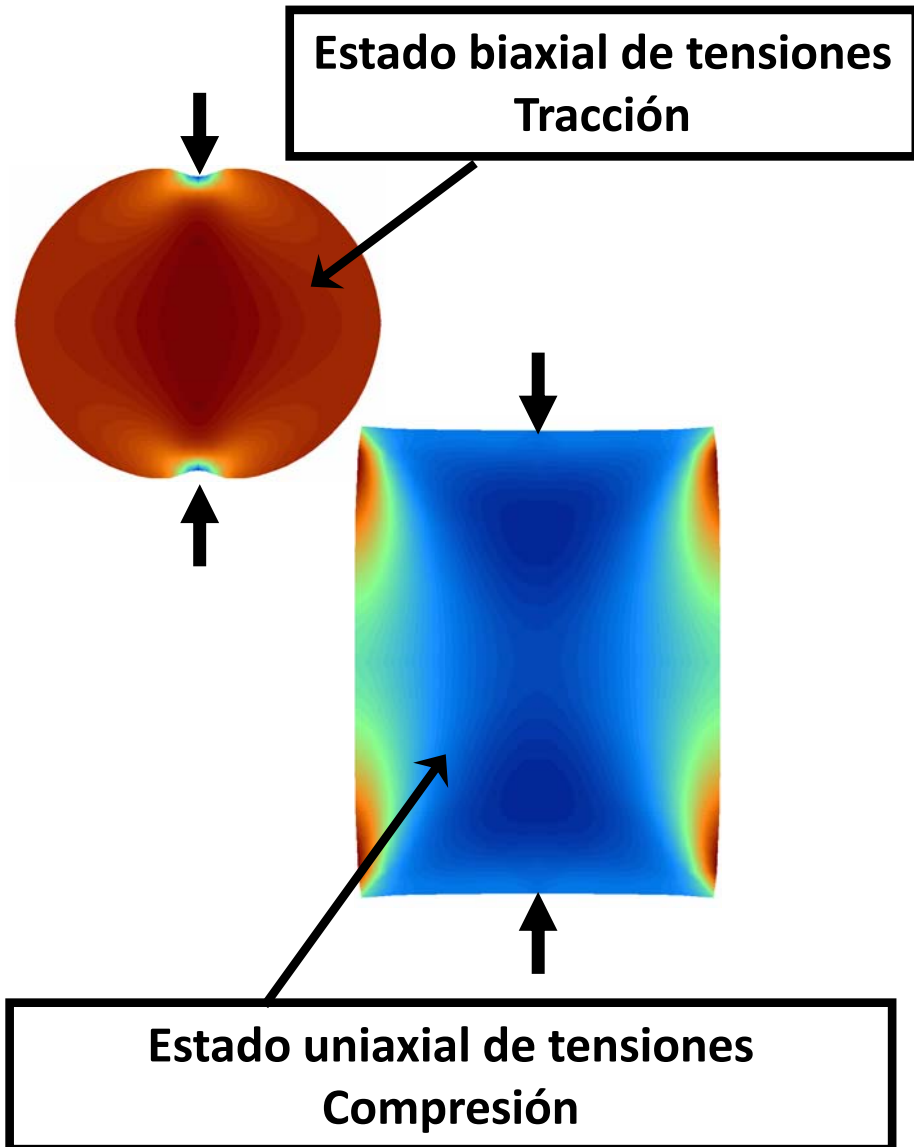
Si el Módulo Dinámico $|E^*|$ es una propiedad fundamental y característica de cada mezcla asfálticas, ella podría ser determinada mediante cualquier metodología experimental e independientemente del procedimiento de ensayos.

Si es verdadera



Utilizar otra configuración de ensayo aplicable a probetas del tipo Marshall o a testigos calados de pavimentos en servicio.

Validación de esta hipótesis



Frecuencias: 5, 4, 2, 1, 0.5, 0.25 y 0.1 Hz
Temperaturas: 10, 20, 30 y 40 °C

Validación de esta hipótesis

**$|E^*|$ y ϕ en
Compresión Uniaxial**



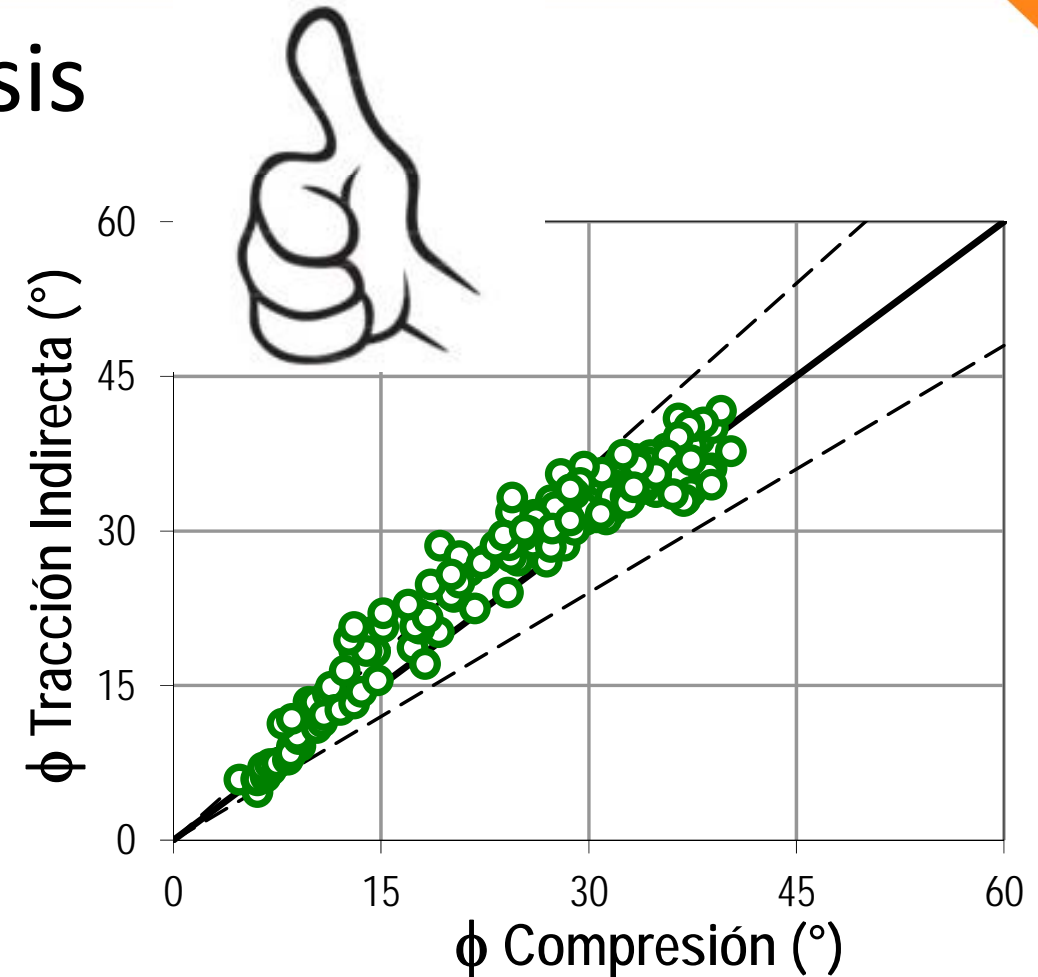
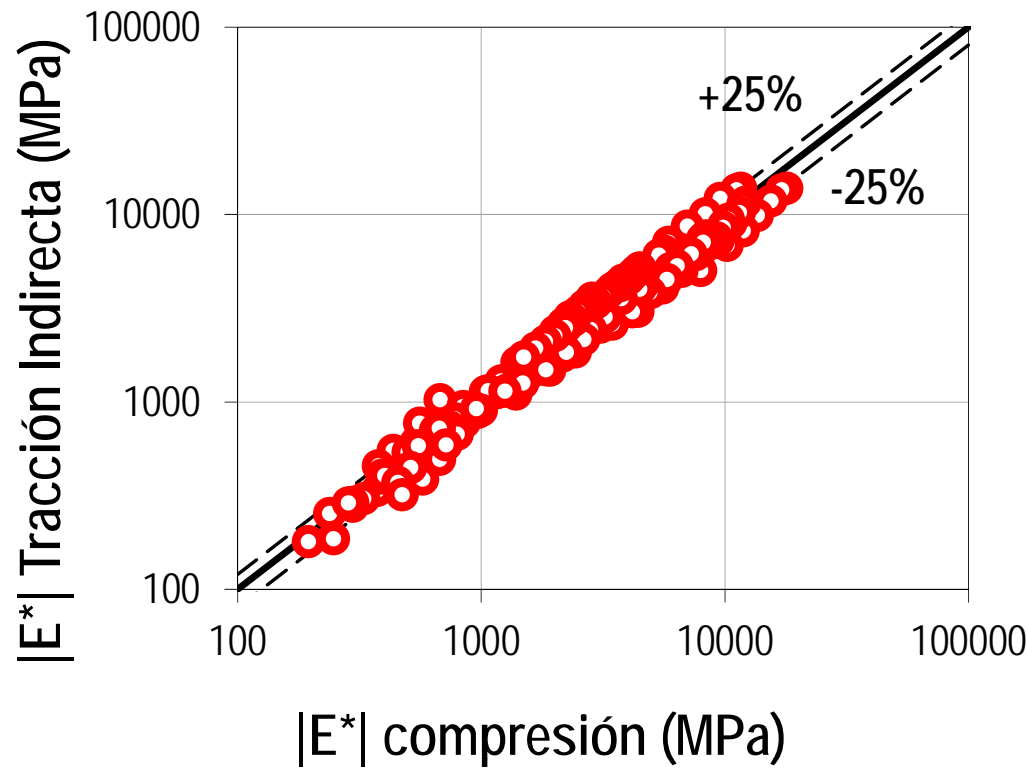
**Comparación de
Resultados
($|E^*|$ y ϕ)**



**$|E^*|$ y ϕ en
Tracción Indirecta**



Validación de esta hipótesis



Metodología validada para determinar $|E^*|$ no es posible disponer de probetas esbeltas ($h/D > 1,5$)

Procedimiento normalizado en EN 12697-26:2019, Anexo F

Módulo Resiliente (M_r) de mezclas asfálticas

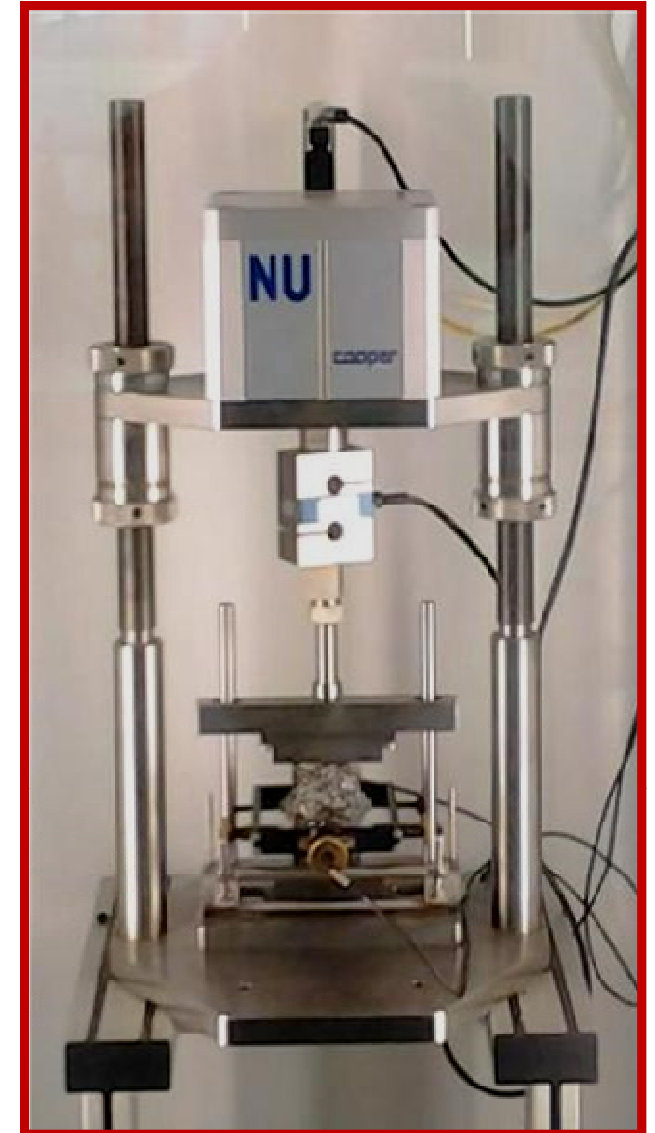
1968

Kennedy, T.W. and W. R. Hudson. "**Application of the Indirect Tensile Test to Stabilized Materials**," Highway Research Board Annual Meeting, Washington, D.C.

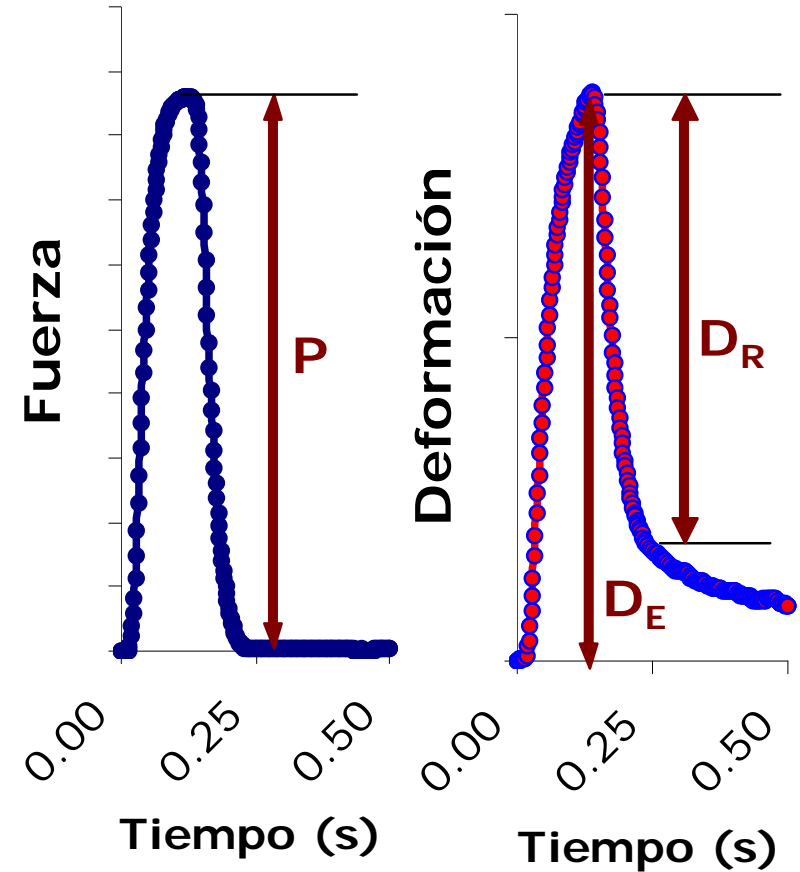
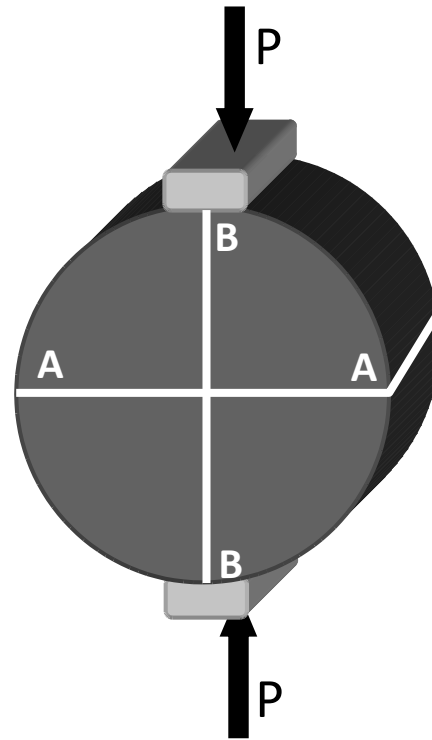
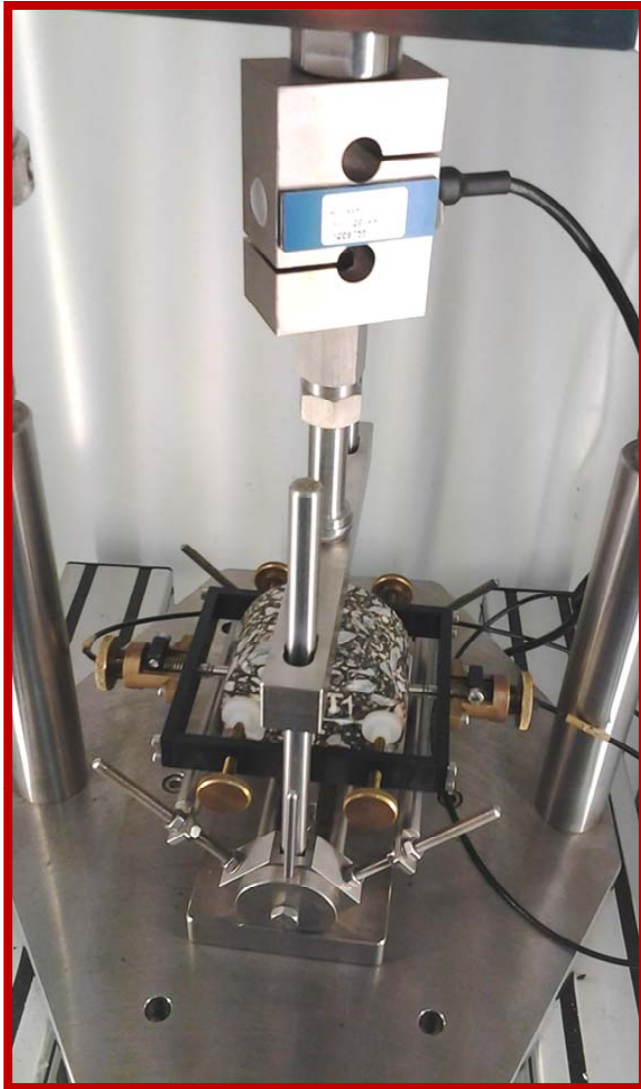
1989

Cooper, K.E. and Brown, S. F. "**Development of a Simple Apparatus for the Measurement of the Mechanical Properties of Asphalt Mixes**", Proc. Eurobitume Symp., Madrid, pp 494-498

Nottingham Asphalt
Tester (NAT)



Módulo Resiliente (Mr) (Rigidez)

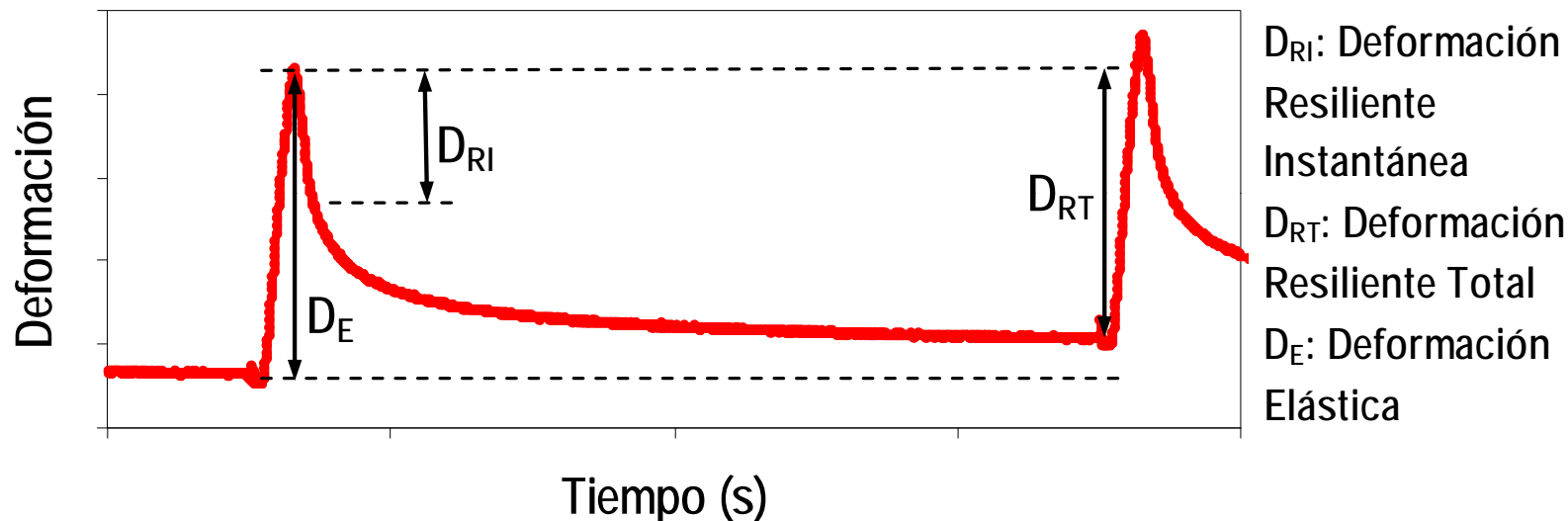


$$M_R = \frac{P}{D \cdot h} (0.27 + v)$$

Variedad de Normas de Ensayo (Diferencias)

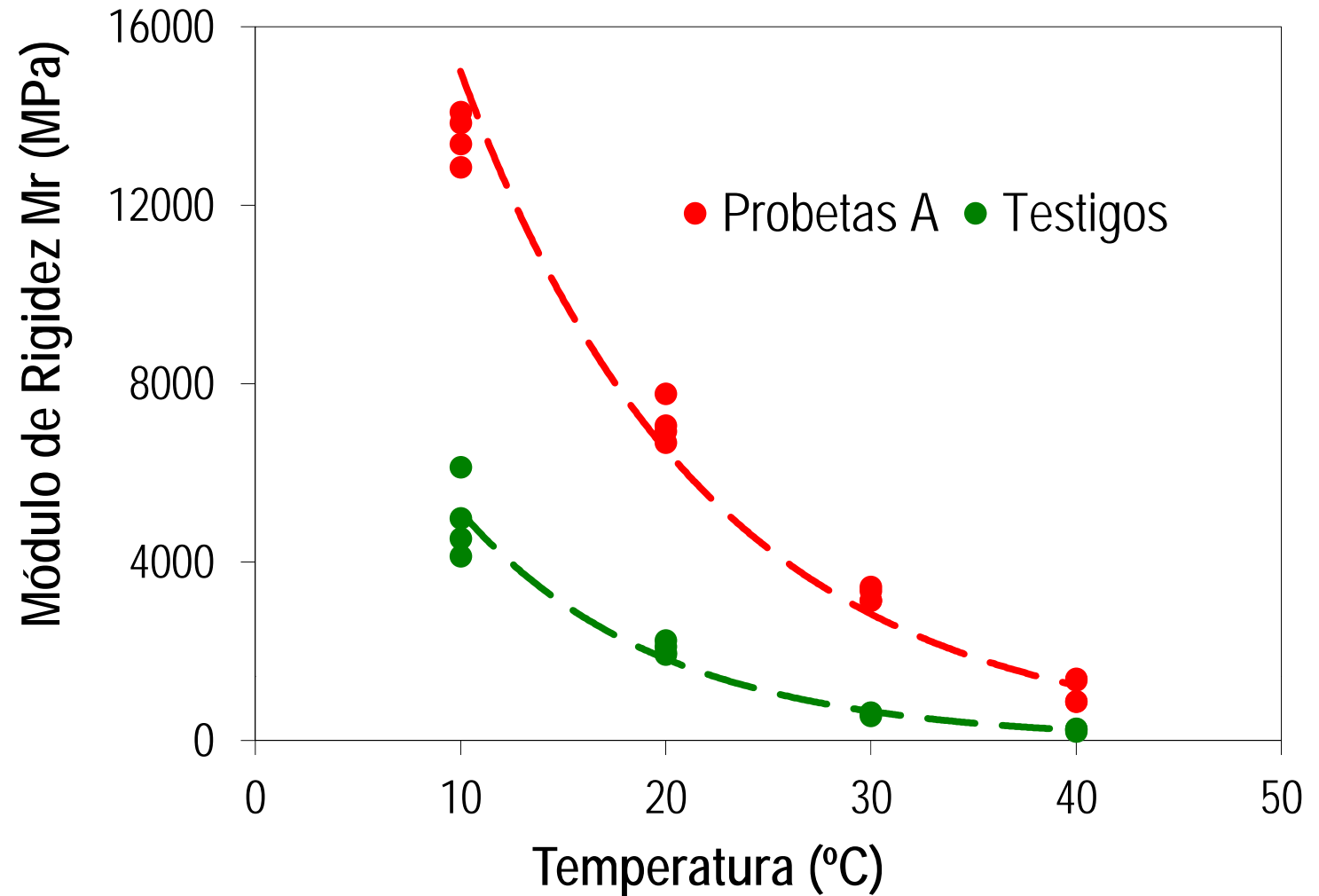
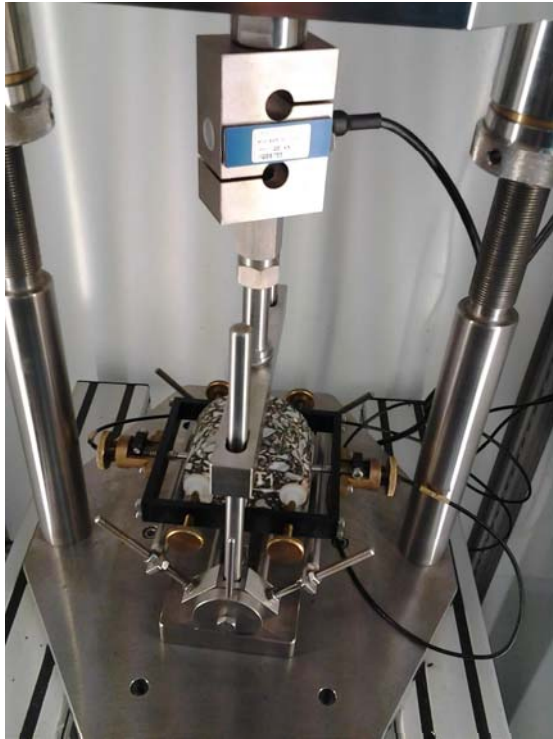
Distintos procedimientos de ensayo con similitudes y diferencias:

- **Deformación recuperable (resiliente) instantánea o total**
 - ASTM D 4123 (EE.UU)
 - DNIT 135/2010 – ME (Brasil)
 - NLT-360 (España)
 - AS 2891.13 (Australia)
- **Deformación elástica**
 - EN 12697-26 (Anexo C) (Europa) basada en la DD-213 (Inglaterra)



Todas calculan el "módulo" con la misma ecuación

Resultados Mr



Consideraciones finales

- Desvinculación con otras áreas de la **Ingeniería Civil**
- Impulso a la transición de lo empírico a lo **mecanístico**
- Conceptos que no son modernos, son **actuales**
- Mayores vidas útiles de los pavimentos, menores costos de construcción y mantenimiento
- Posibilidad de “conocer” el **desempeño de materiales** innovadores o con materiales reciclados
- Afianzar el concepto de **SUSTENTABILIDAD** en el diseño de pavimentos



Módulo Dinámico de Mezclas Asfálticas

Prof. Dr. Ing. Fernando Martínez

Laboratorio Vial - (IMAE)

Facultad de Cs. Exactas, Ingeniería y Agrimensura

Universidad Nacional de Rosario.

Argentina

Muchas gracias

<https://www.fceia.unr.edu.ar/laboratoriovial/publicaciones.php>

