

XIII Congreso Mexicano del Asfalto. 20, 21y 22 de agosto de 2025, Cancún, Quintana Roo, México



@AMAACmx

<http://www.amaac.org.mx>



NUEVO MÉTODO DE PRUEBA UTILIZANDO EL REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD DE ADITIVO REJUVENECEDOR QUE SE DEBE DE ADICIONAR A UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON RAP

KaO

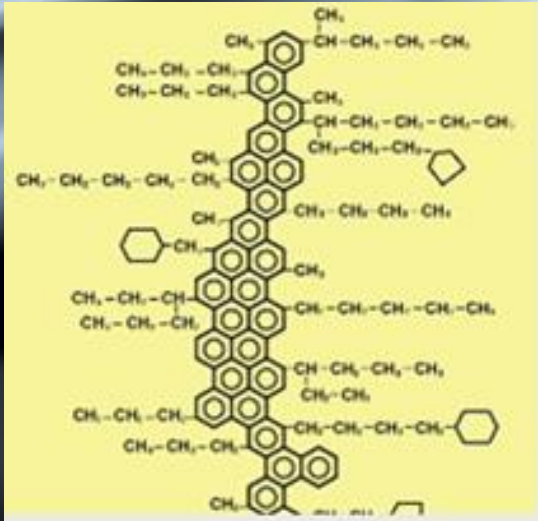
Kirei-Making Life Beautiful

Álvaro Gutiérrez Muñiz

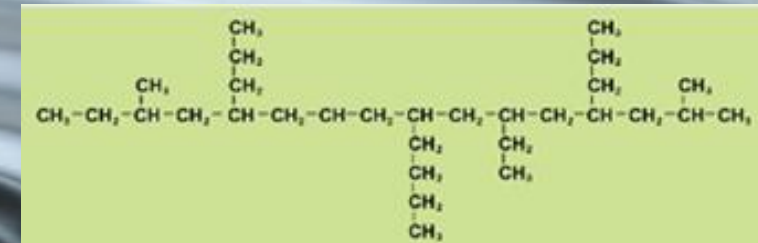
XIII Congreso Mexicano del Asfalto. 20, 21 y 22 de agosto de 2025, Cancún, Quintana Roo, México

ASFALTO

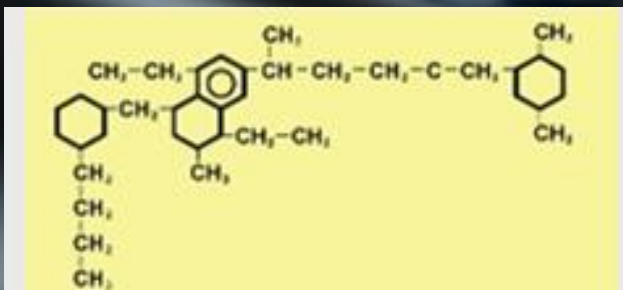
Asfaltenos



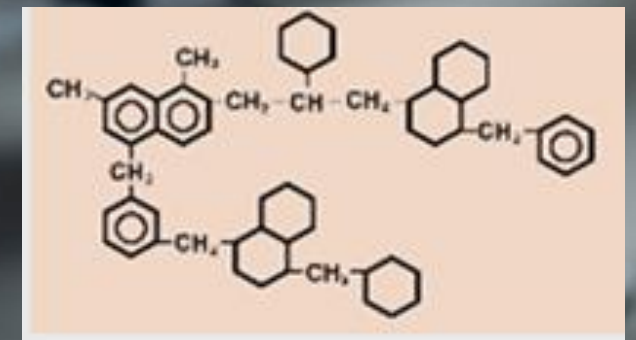
Saturados



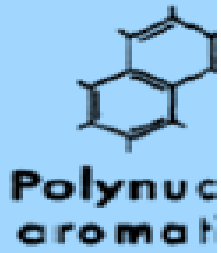
Resinas



Aromáticos



Elemento	% de composición
Carbono	82 a 88
Hidrógeno	8 a 11
Azufre	0 a 6
Oxígeno	0 a 2
Nitrógeno	0 a 1



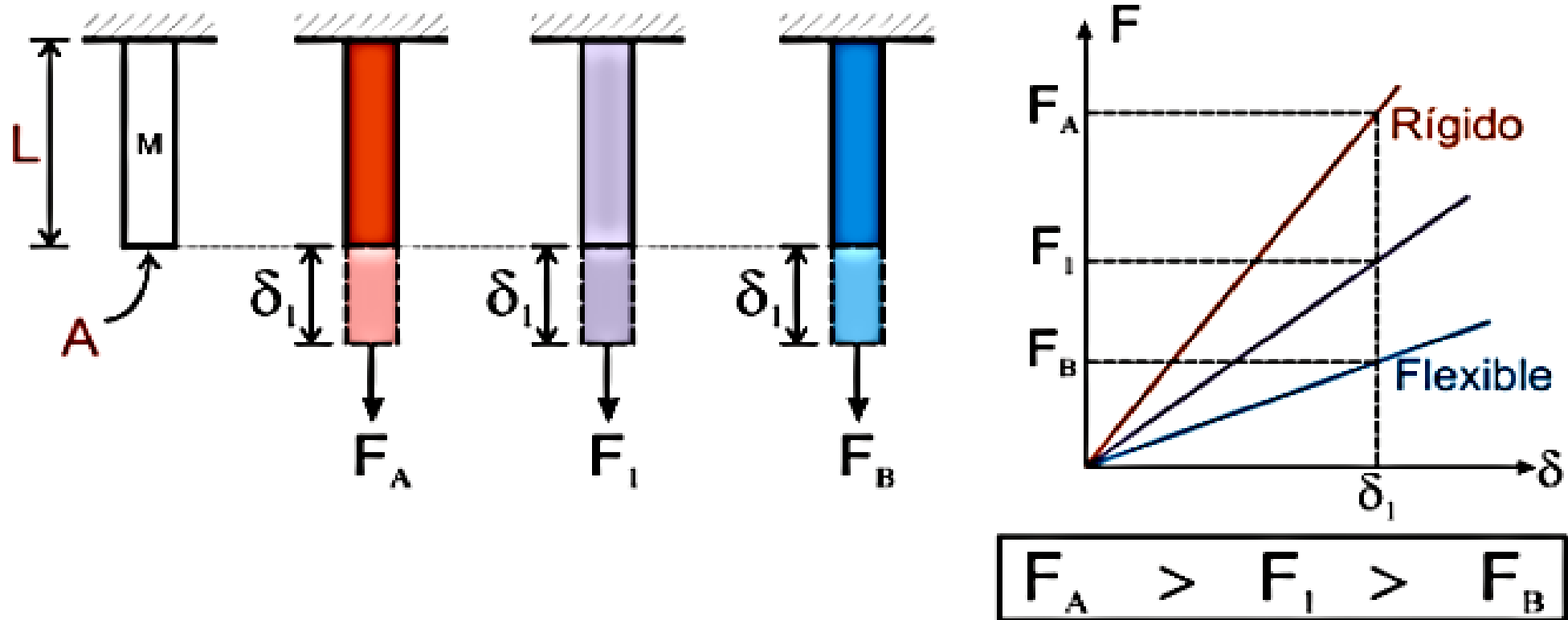
Fraction	Number of molecules	Virgin binder		Aged binder	
		Chemical formula	Mass fraction	Chemical formula	Mass fraction
Saturate	4	$C_{30}H_{62}$	10.7	$C_{30}H_{62}$	9.9
	4	$C_{35}H_{62}$		$C_{35}H_{62}$	
Aromatic	11	$C_{35}H_{44}$	30.6	$C_{35}H_{36}O_4$	31.08
	13	$C_{30}H_{46}$		$C_{30}H_{42}O_2$	
Resin	4	$C_{40}H_{59}N$	38.1	$C_{40}H_{55}NO_2$	37.98
	4	$C_{40}H_{60}S$		$C_{40}H_{56}O_3S$	
	5	$C_{29}H_{50}O$		$C_{29}H_{48}O_2$	
	4	$C_{36}H_{57}N$		$C_{36}H_{53}NO_2$	
	15	$C_{18}H_{10}S_2$		$C_{18}H_{10}O_2S_2$	
Asphaltene	3	$C_{42}H_{55}O$	16.5	$C_{42}H_{146}O_5$	16.94
	2	$C_{66}H_{81}N$		$C_{66}H_{67}NO_7$	
	3	$C_{51}H_{62}S$		$C_{51}H_{54}O_5S$	

AUMENTO DE RIGIDEZ Y FRAGILIDAD



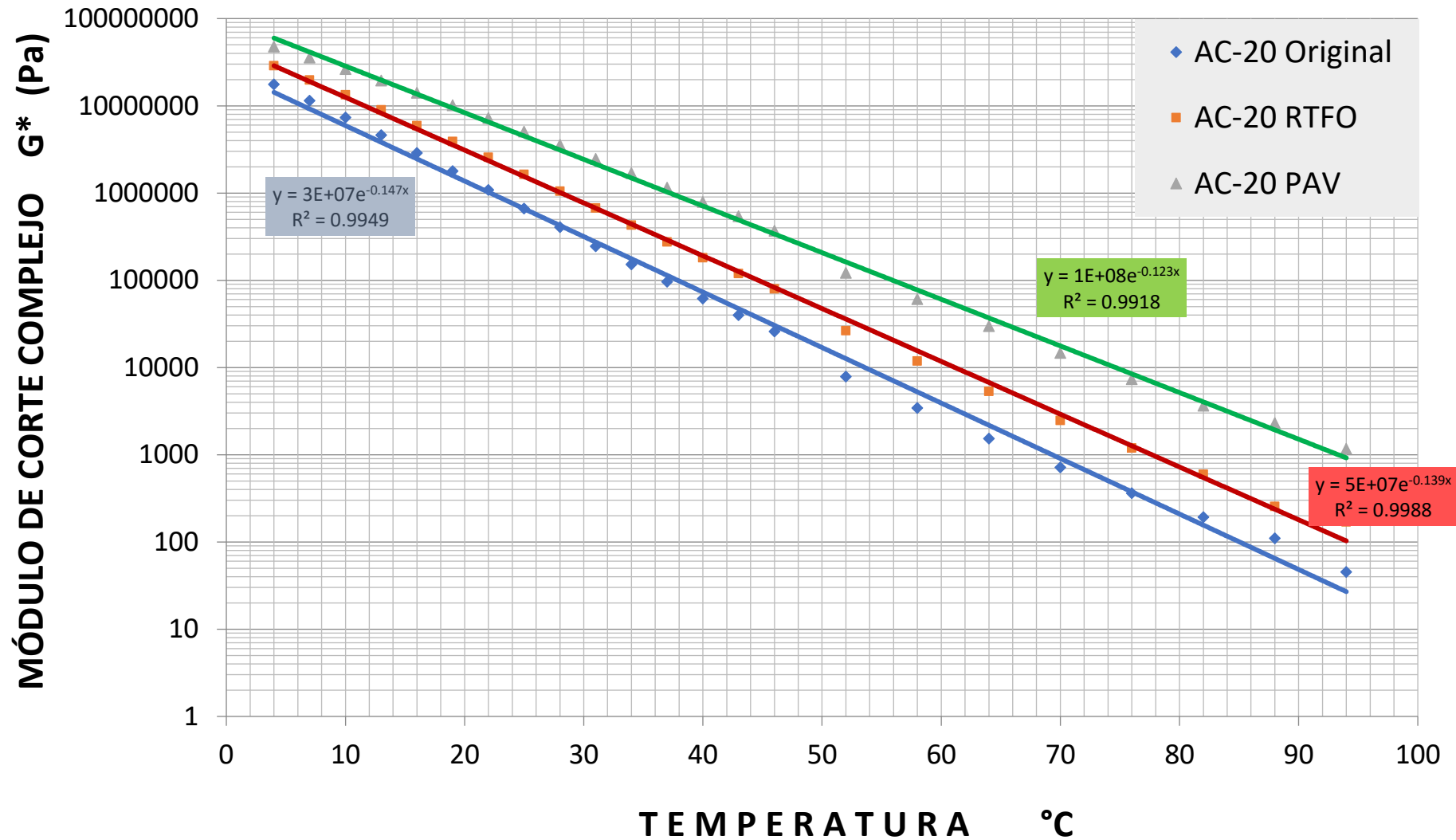
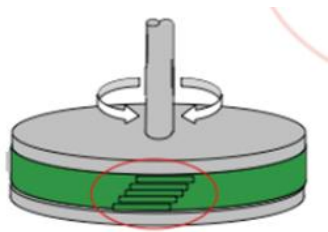
Rigidez ----- Flexibilidad

Tres barras de la misma sección: A y de la misma longitud: L

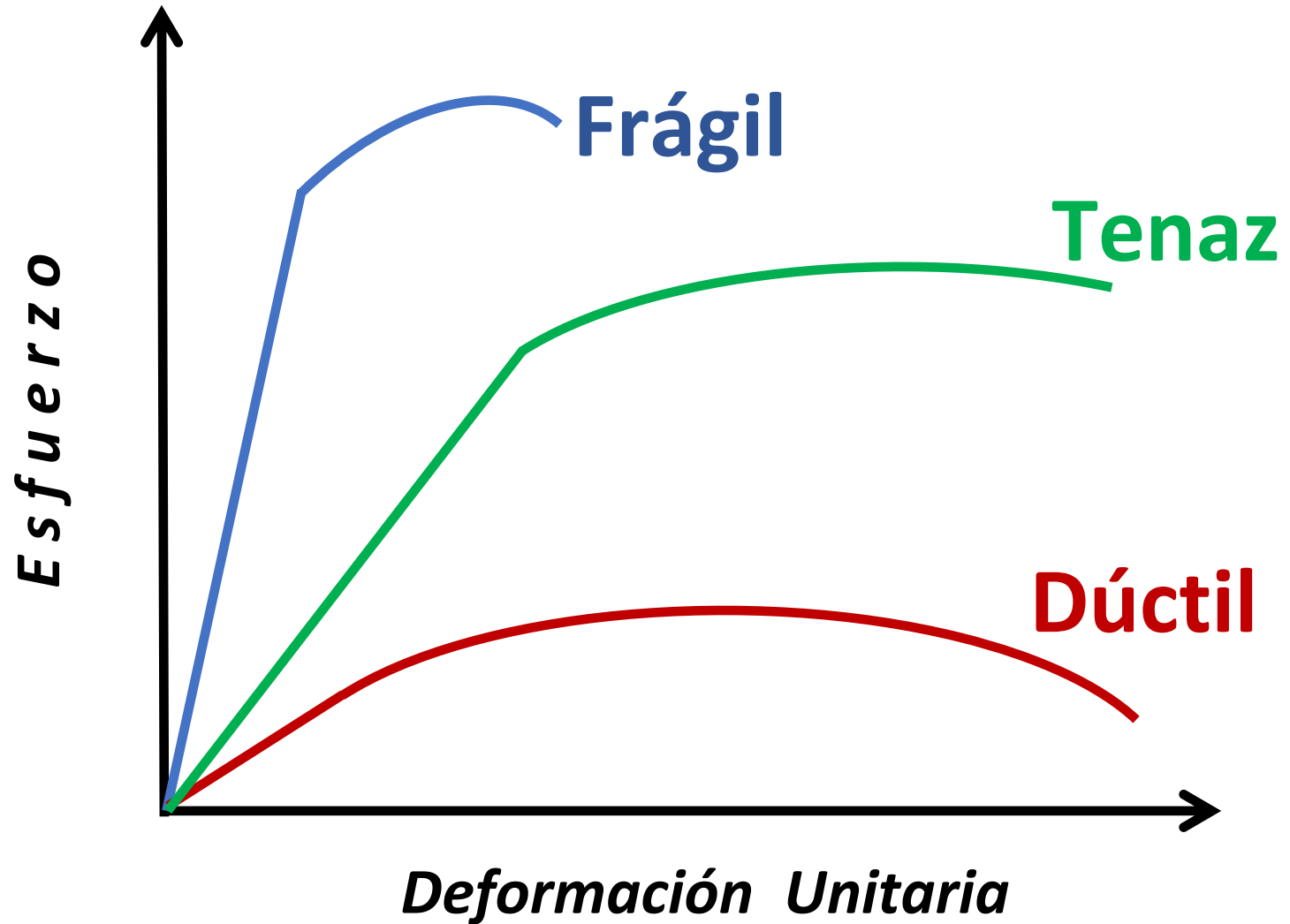


Si utilizamos mayor esfuerzo en una de las barras para deformar la misma cantidad entonces se dice que ese material es más rígido.

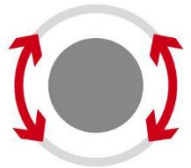
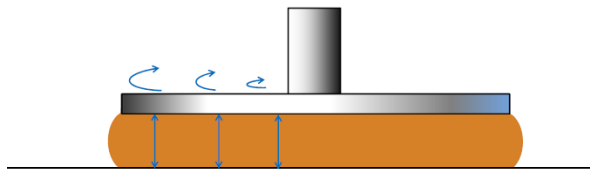
Aumento de la Rigidez del Asfalto en función de la Temperatura y de la Oxidación



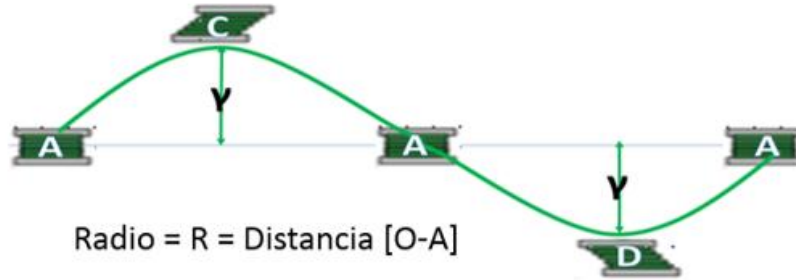
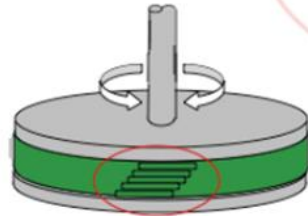
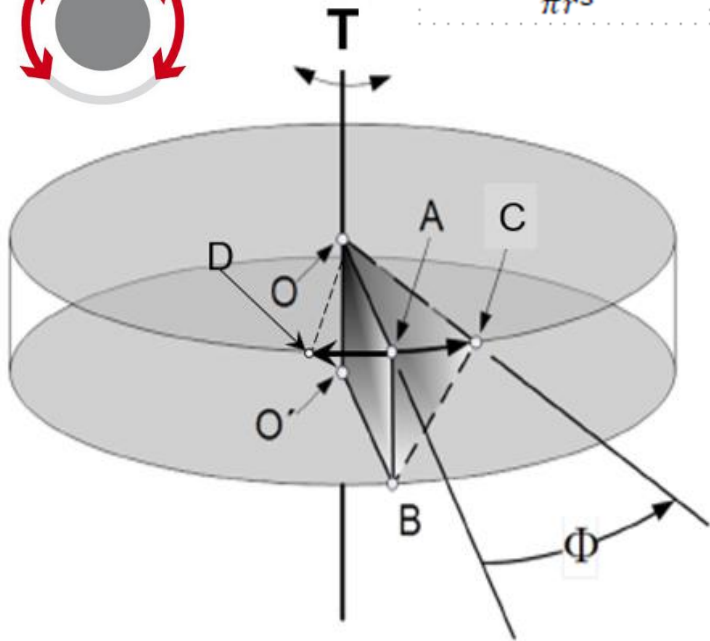
Fragilidad --- Ductilidad



DSR



$$\sigma = \frac{2}{\pi r^3} \times M$$



Radio = R = Distancia [O-A]

Fuerza = (Esfuerzo de corte) * (pi) * (R²)

Phi = Ángulo de Deflexión (radianes)

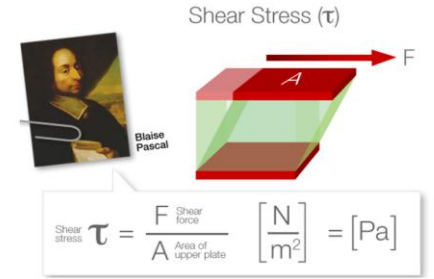
Deformación en corte = gamma = [(Phi) * (R)] / (Distancia [A-B])

1 Ciclo = Distancia [(A-C) + (C-A) + (A-D) + (D-A)]

Desplazamiento = Distancia [A-C] = (Phi) * (R)

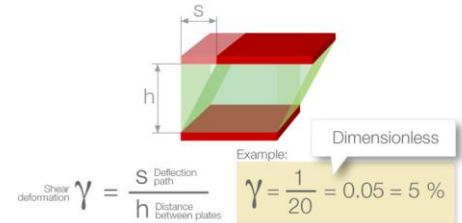
Área de corte = [(0.5) * (R²) * Phi]

G*



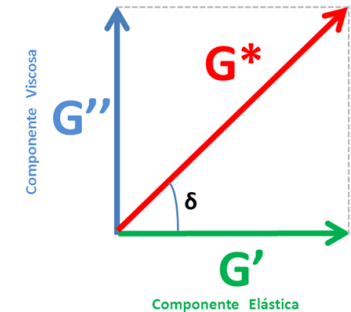
$$\tau = \frac{F \text{ Shear force}}{A \text{ Area of upper plate}} \left[\frac{N}{m^2} \right] = [Pa]$$

Shear Deformation / Shear Strain (gamma)



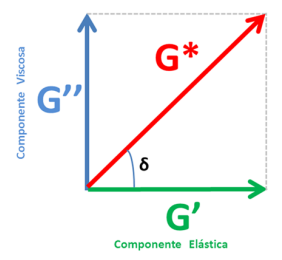
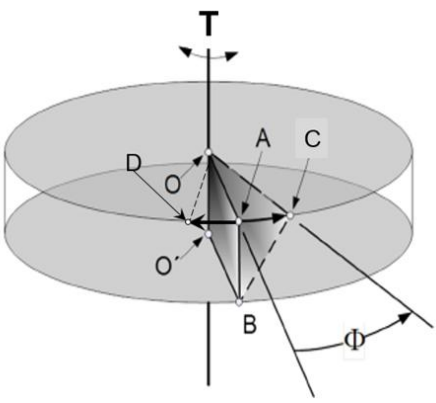
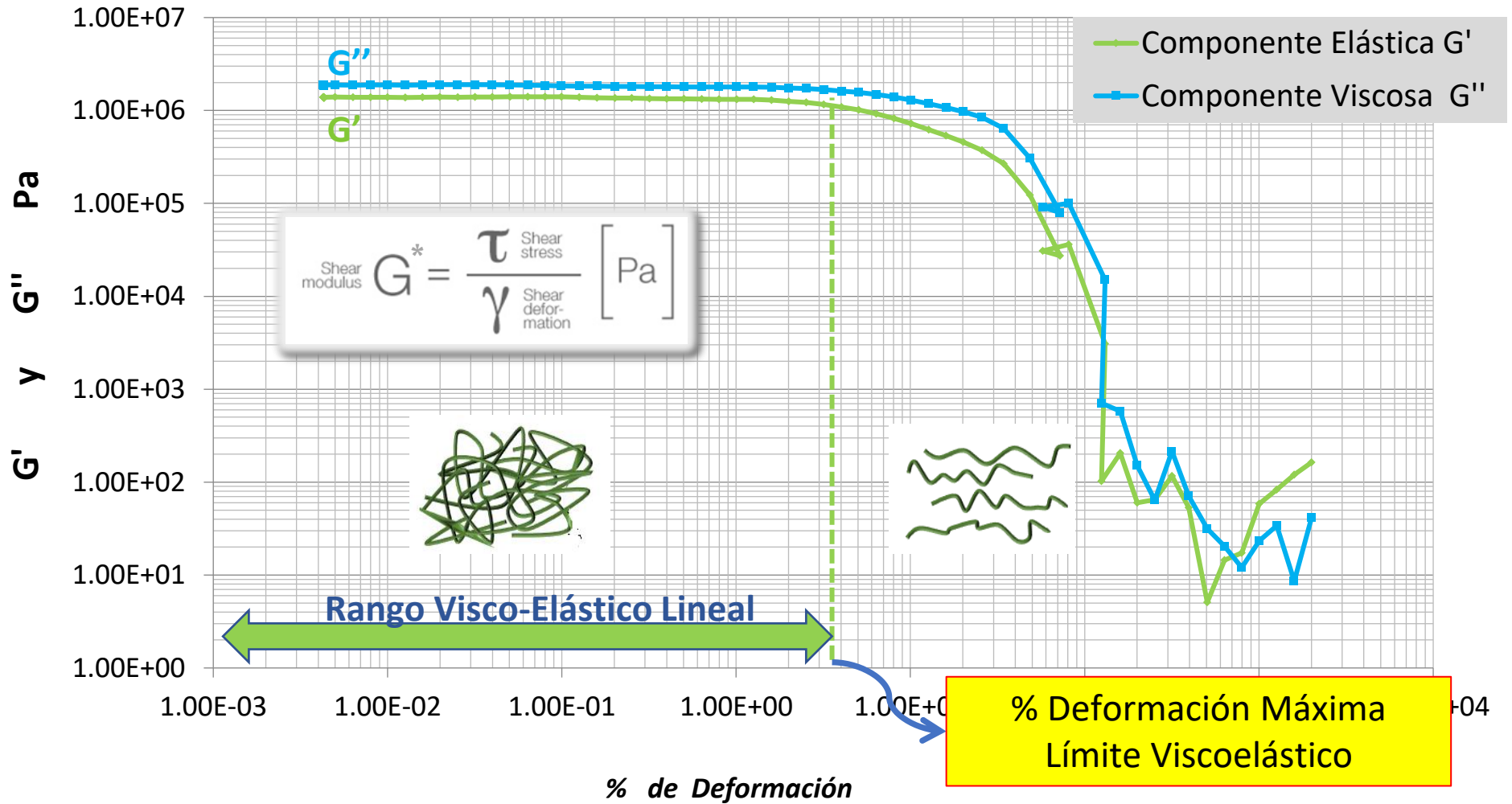
$$\gamma = \frac{S \text{ Deflection path}}{h \text{ Distance between plates}} \quad \text{Dimensionless}$$

Example: $\gamma = \frac{1}{20} = 0.05 = 5\%$

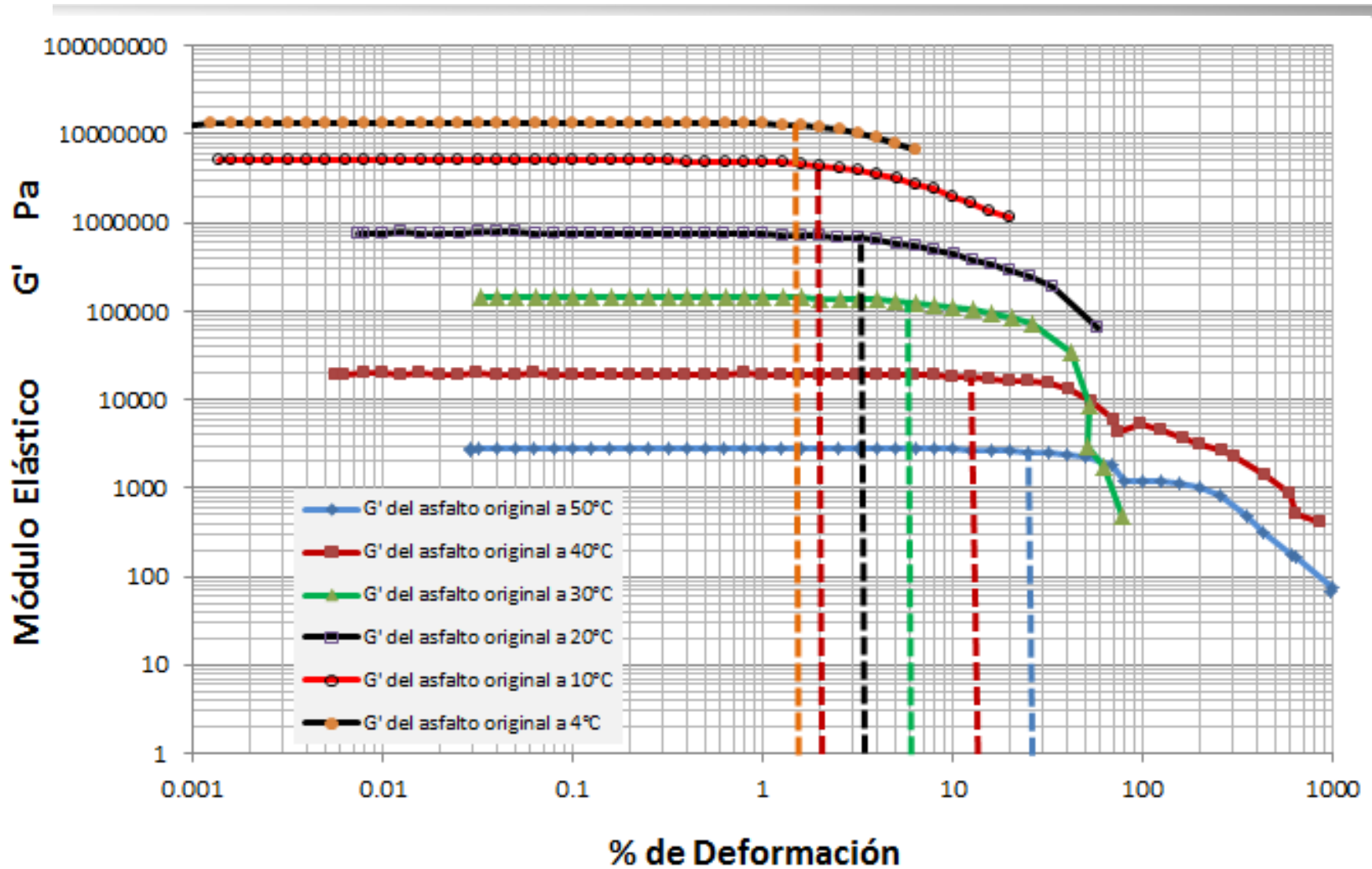


Determinación del Rango Viscoelástico Lineal

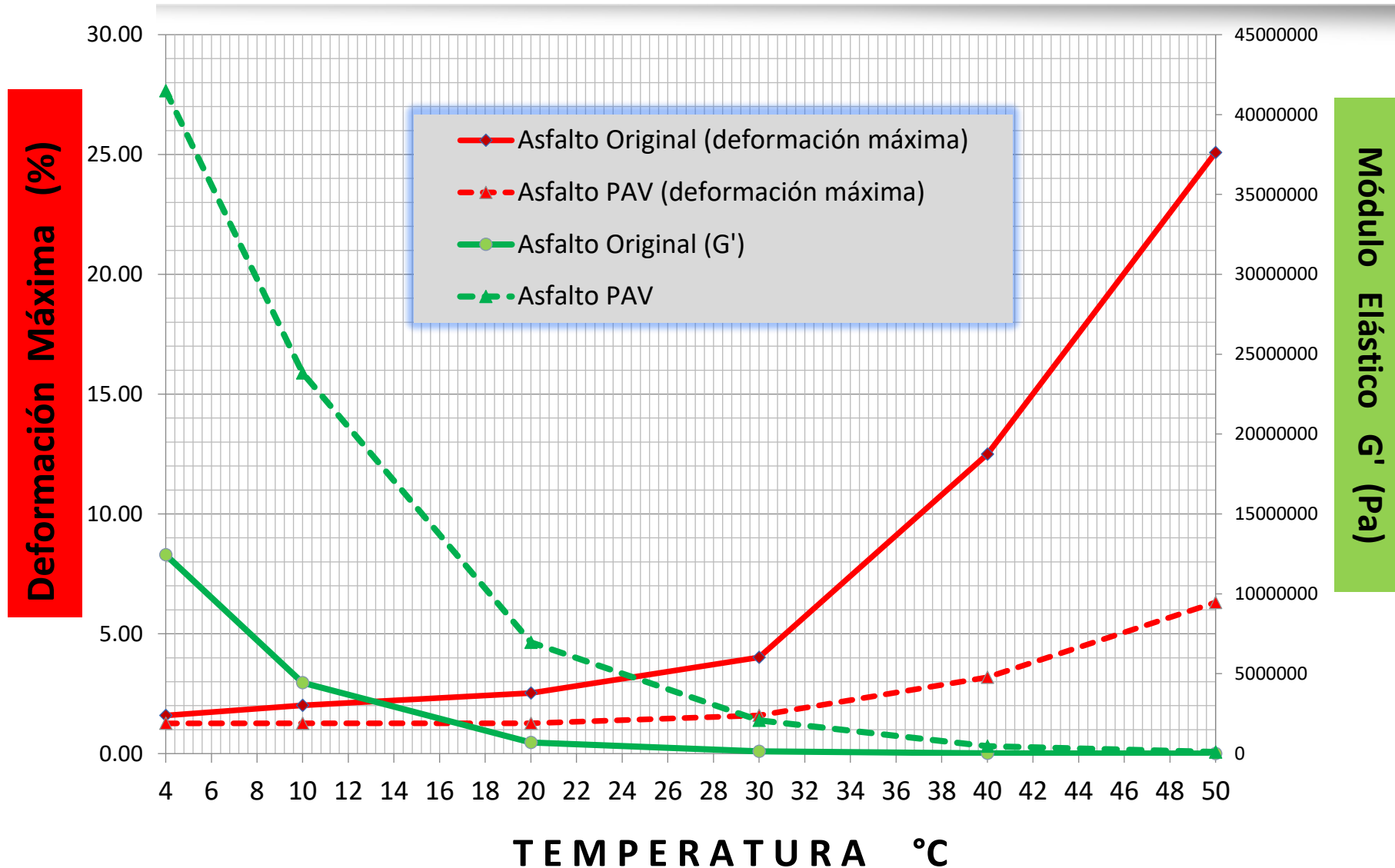
AC-20 Original a 20°C



Determinación del Rango Viscoelástico Lineal a diferentes Temperaturas

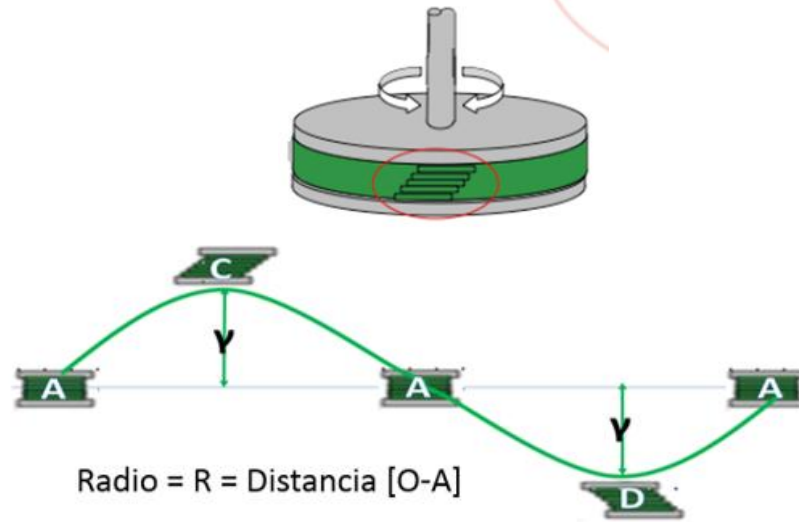
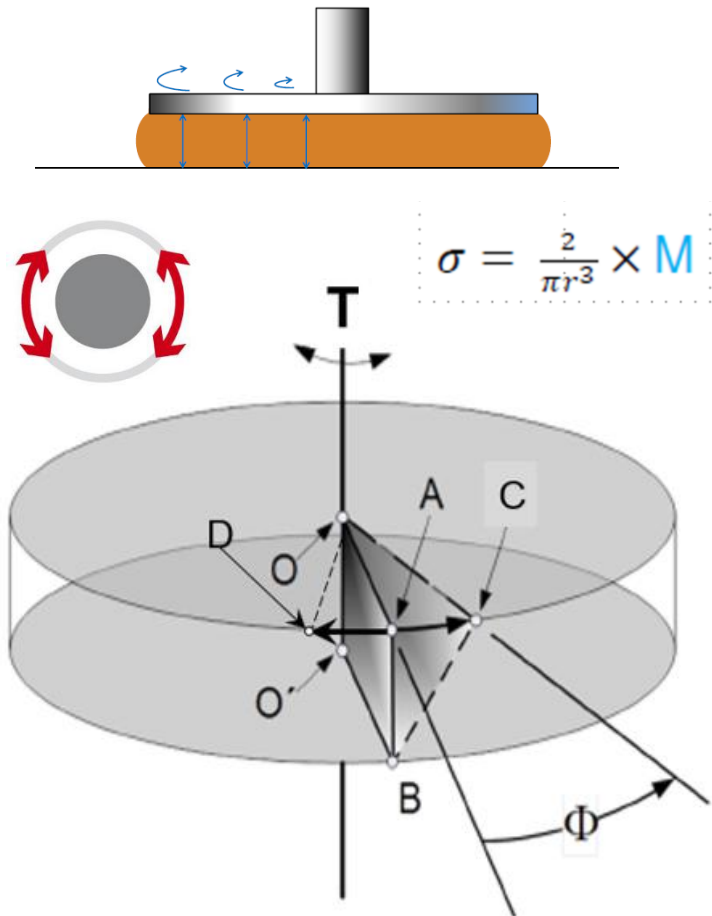


Rango Viscoelástico Lineal y Módulo de Corte Complejo



Fundamentos teóricos de este nuevo de prueba para determinar la cantidad de aditivo rejuvenecedor

D S R



Radio = R = Distancia [O-A]

Fuerza = (Esfuerzo de corte) * (π) * (R²)

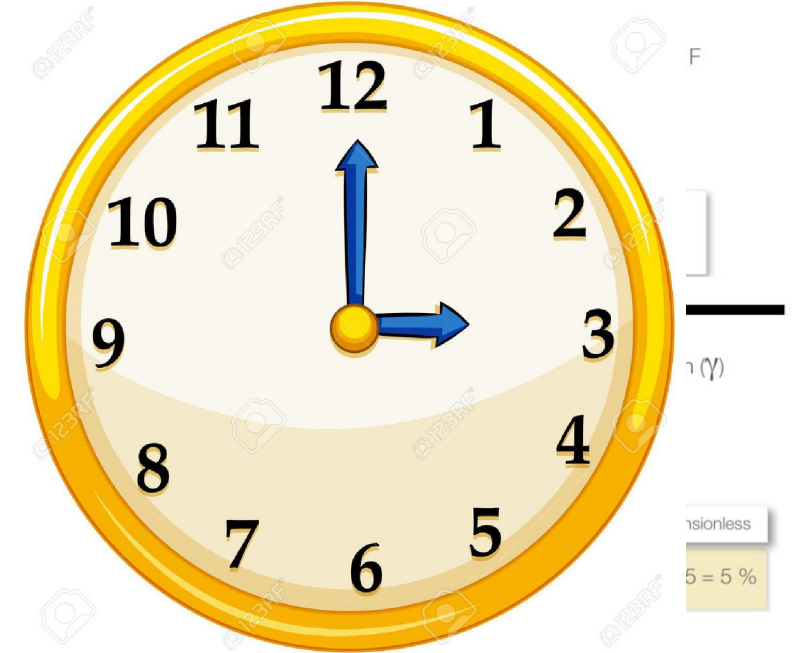
Φ = Ángulo de Deflexión (radianes)

Deformación en corte = $\gamma = \frac{[(\Phi) * (R)]}{(\text{Distancia [A-B]})}$

1 Ciclo = Distancia [(A-C) + (C-A) + (A-D) + (D-A)]

Desplazamiento = Distancia [A-C] = (Φ) * (R)

Área de corte = [(0.5) * (R²) * Φ]



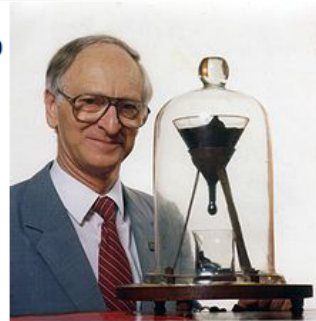
Barrido de deformación a 20° C donde la distancia AC comienza en 0.001mm y termina en 1 mm generándose 1010 mediciones

Tiempo de aplicación del esfuerzo (Frecuencia ω)

Tiempo de carga

Asphalt binders are viscoelastic liquids

- The University of Queensland pitch drop experiment, featuring its then-current custodian, Professor John Mainstone (taken in 1990, two years after the seventh drop and 10 years before the eighth drop fell).
- Started in 1927 (8 drops in 88 years!)
- Material has a viscosity of about 230,000,000,000 times that of water!
 - Still a liquid!
 - Other example – Gilsonite – still a visco-elastic liquid!



Gilsonite – viscoelastic liquid!

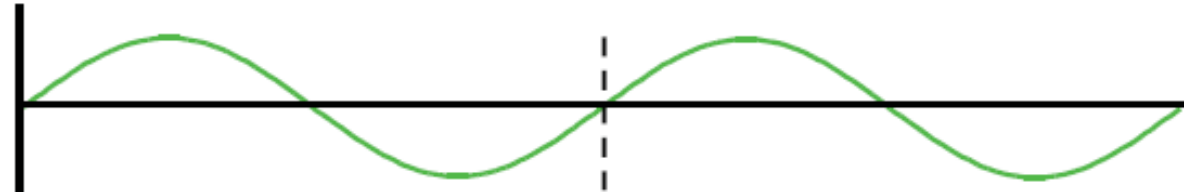
RHEOBIT
Workshops



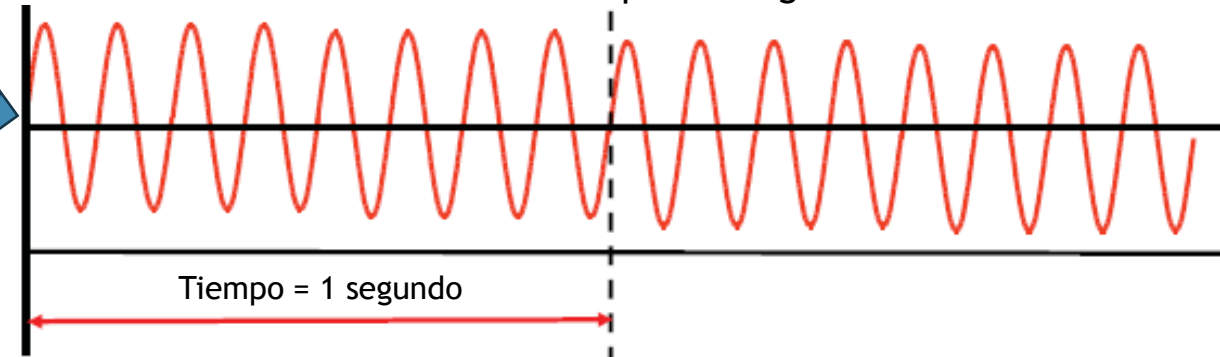
Slide 34



Baja Frecuencia (el asfalto se comporta como un líquido)
Mucho tiempo de carga

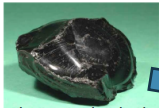


Alta Frecuencia (el asfalto se comporta como un sólido)
Poco tiempo de carga



Asphalt binders are viscoelastic liquids

- The University of Queensland pitch drop experiment, featuring its then-current custodian, Professor John Mainstone (taken in 1990, two years after the seventh drop and 10 years before the eighth drop fell).
- Started in 1927 (8 drops in 88 years!)
- Material has a viscosity of about 230,000,000,000 times that of water!
 - Still a liquid!
 - Other example – Gilsonite – still a visco-elastic liquid!

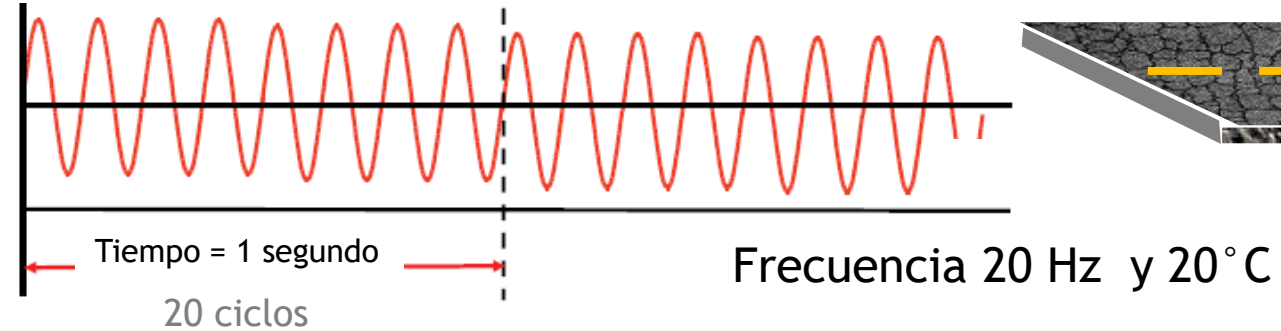
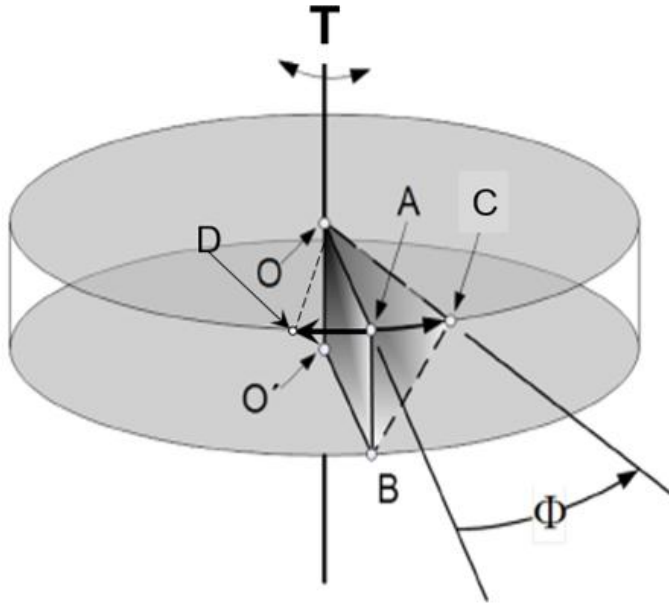


Gilsonite – viscoelastic liquid!

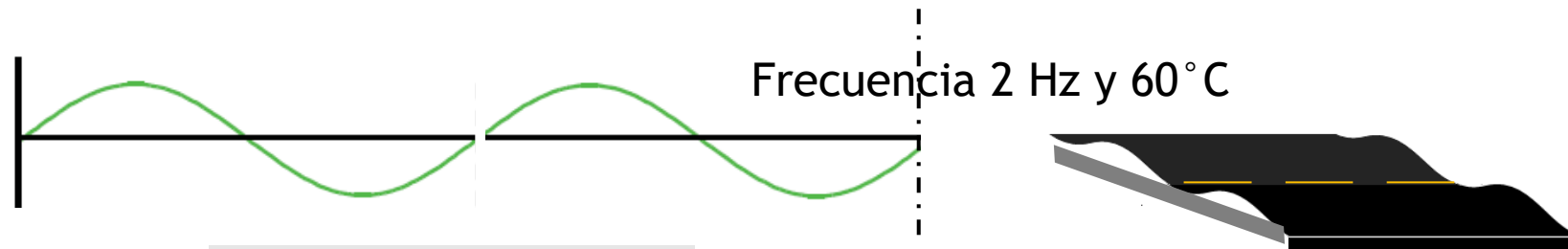
Slide 34

NUEVO MÉTODO DE PRUEBA UTILIZANDO EL REÓMETRO DE CORTE DINÁMICO PARA DETERMINAR LA CANTIDAD DE ADITIVO REJUVENECEDOR QUE SE DEBE DE ADICIONAR A UNA MEZCLA ASFÁLTICA CON RAP

1.- Evaluación de la Resistencia a la fisuración fatiga



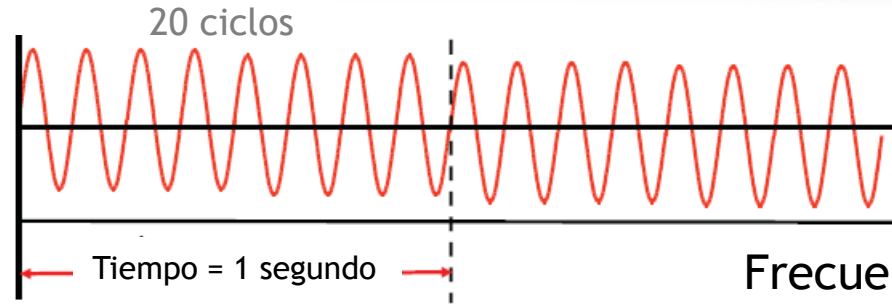
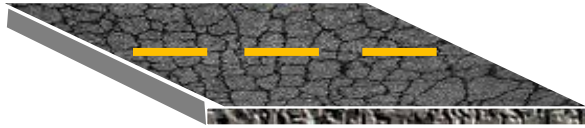
2.- Evaluación de la Resistencia a la Deformación Permanente



$$U^* = \frac{1}{V} \int f dx = \int \frac{f}{A} dx/L = \int \sigma d\epsilon$$

Energía de Fluidez Joules/m³

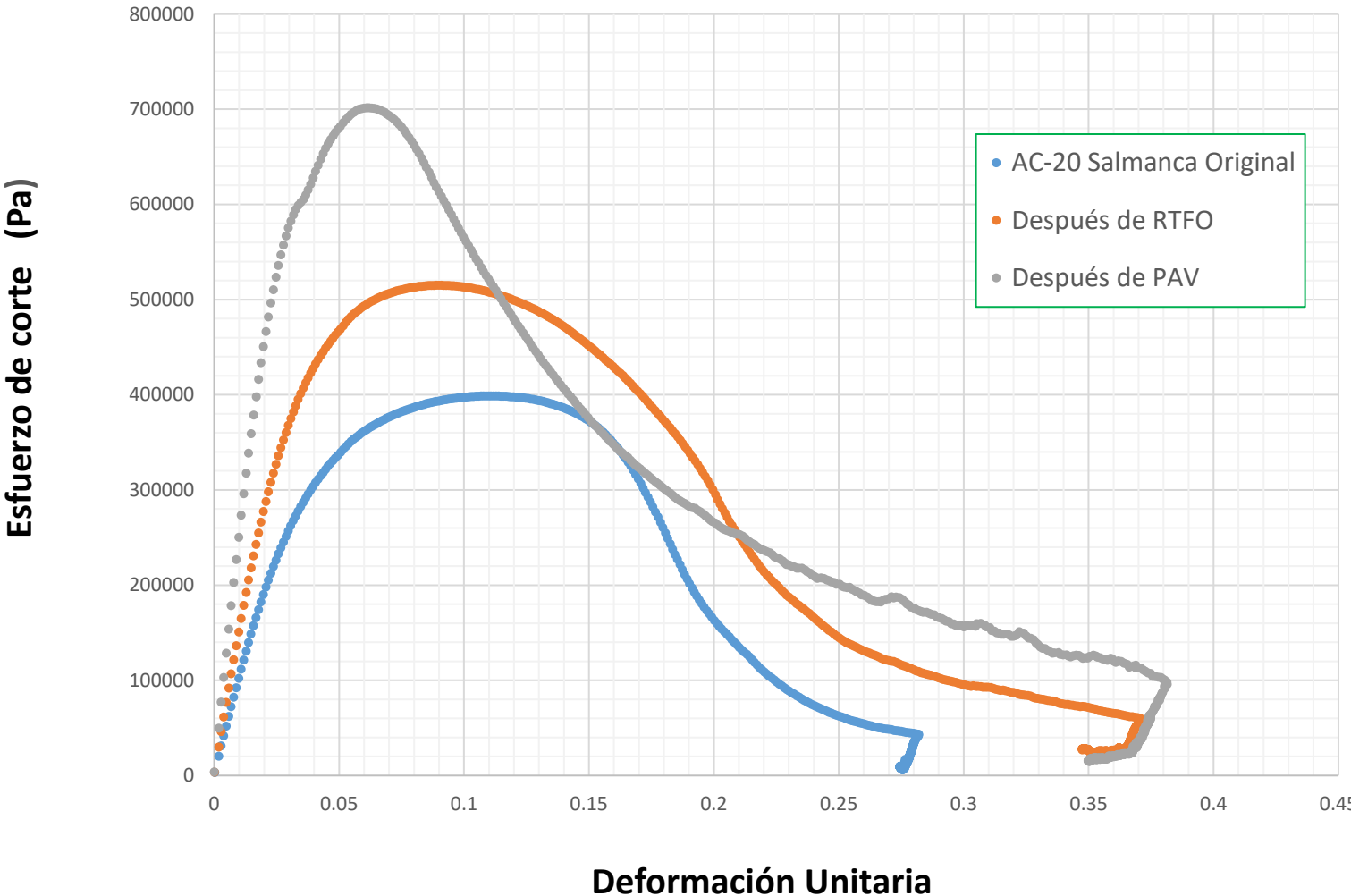
1. Evaluación de la Resistencia a la fisuración fatiga



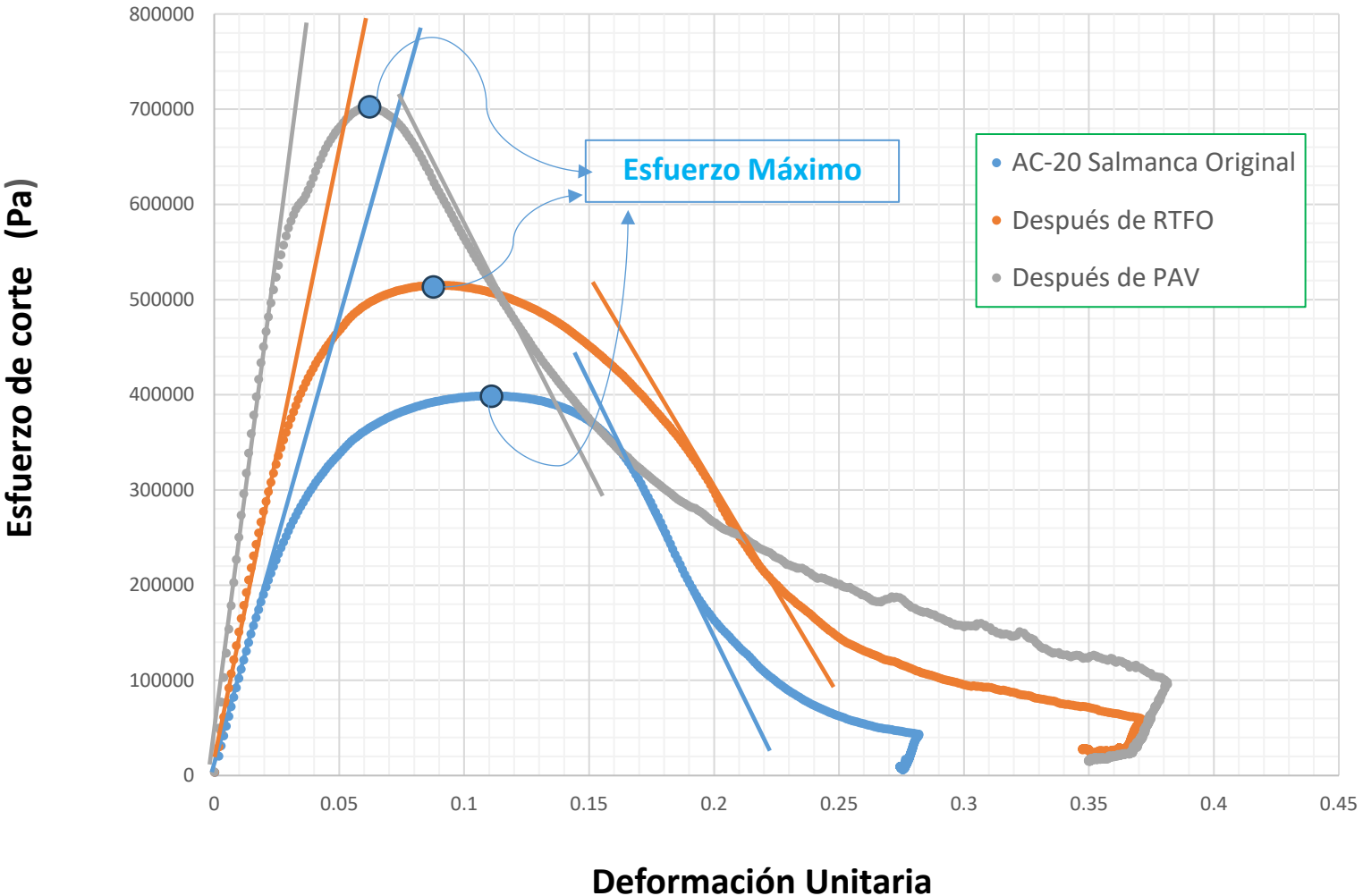
Frecuencia 20 Hz y 20°C

Número de punto	Frecuencia	Módulo de almacenamiento	Módulo de corte complejo Fundamental	Esfuerzo de corte [Pa]	Deformación de corte [%]	Ángulo de cambio de fase Componente Fundamental	Torque [mN·m]	Estado Componente constante	Módulo de pérdida [Pa]	Temperatura [°C]	Deformación Unitaria Sin unidades
1	20	3.22E+06	4859613	2257.22	0.05	1	48.45	0.34025 TruStrain™	3.64E+06	20	0.0005
2	20	3.23E+06	4841296	9273.47	0.19	1	48.09	1.3979 TruStrain™	3.60E+06	20	0.0019
3	20	3.23E+06	4841231	14251.6	0.29	2	48.13	2.1483 TruStrain™	3.61E+06	20	0.0029
4	20	3.22E+06	4836437	19033.8	0.39	2	48.21	2.8692 TruStrain™	3.61E+06	20	0.0039
5	20	3.21E+06	4833661	23807.7	0.49	3	48.31	3.5888 TruStrain™	3.61E+06	20	0.0049
6	20	3.21E+06	4821458	28532.1	0.59	3	48.32	4.301 TruStrain™	3.60E+06	20	0.0059
7	20	3.19E+06	4807681	33210.0	0.69	4	48.42	5.0061 TruStrain™	3.60E+06	20	0.0069
8	20	3.18E+06	4794250	37867.3	0.79	4	48.48	5.7081 TruStrain™	3.59E+06	20	0.0079
9	20	3.16E+06	4779050	42483.1	0.89	5	48.55	6.4039 TruStrain™	3.58E+06	20	0.0089
1000	20	84096	84095.9	29092.88	34.59	500	0	4.3855 ME-,MV-,taD,1	4.2048	20	0.3459
1001	20	83959	83958.55	29047.13	34.6	501	0	4.3786 ME-,MV-,taD,1	4.1979	20	0.346
1002	20	84105	84104.65	29096.87	34.6	501	0	4.3861 ME-,MV-,taD,1	4.2052	20	0.346
1003	20	84076	84075.5	29087.17	34.6	502	0	4.3846 ME-,MV-,taD,1	4.2038	20	0.346
1004	20	84154	84154.39	29113.96	34.6	502	0	4.3886 ME-,MV-,taD,1	4.2077	20	0.346
1005	20	84019	84019.04	29068.6	34.6	503	0	4.3818 ME-,MV-,taD,1	4.201	20	0.346
1006	20	84201	84201.39	29128.77	34.59	503	0	4.3909 ME-,MV-,taD,1	4.2101	20	0.3459
1007	20	83994	83993.51	29053.68	34.59	504	0	4.3795 ME-,MV-,taD,1	4.1997	20	0.3459
1008	20	84025	84024.53	29060.9	34.59	504	0	4.3806 ME-,MV-,taD,1	4.2012	20	0.3459
1009	20	83912	83911.65	29019.72	34.58	505	0	4.3744 ME-,MV-,taD,1	4.1956	20	0.3458
1010	20	84016	84015.95	29054.18	34.58	505	0	4.3796 ME-,MV-,taD,1	4.2008	20	0.3458

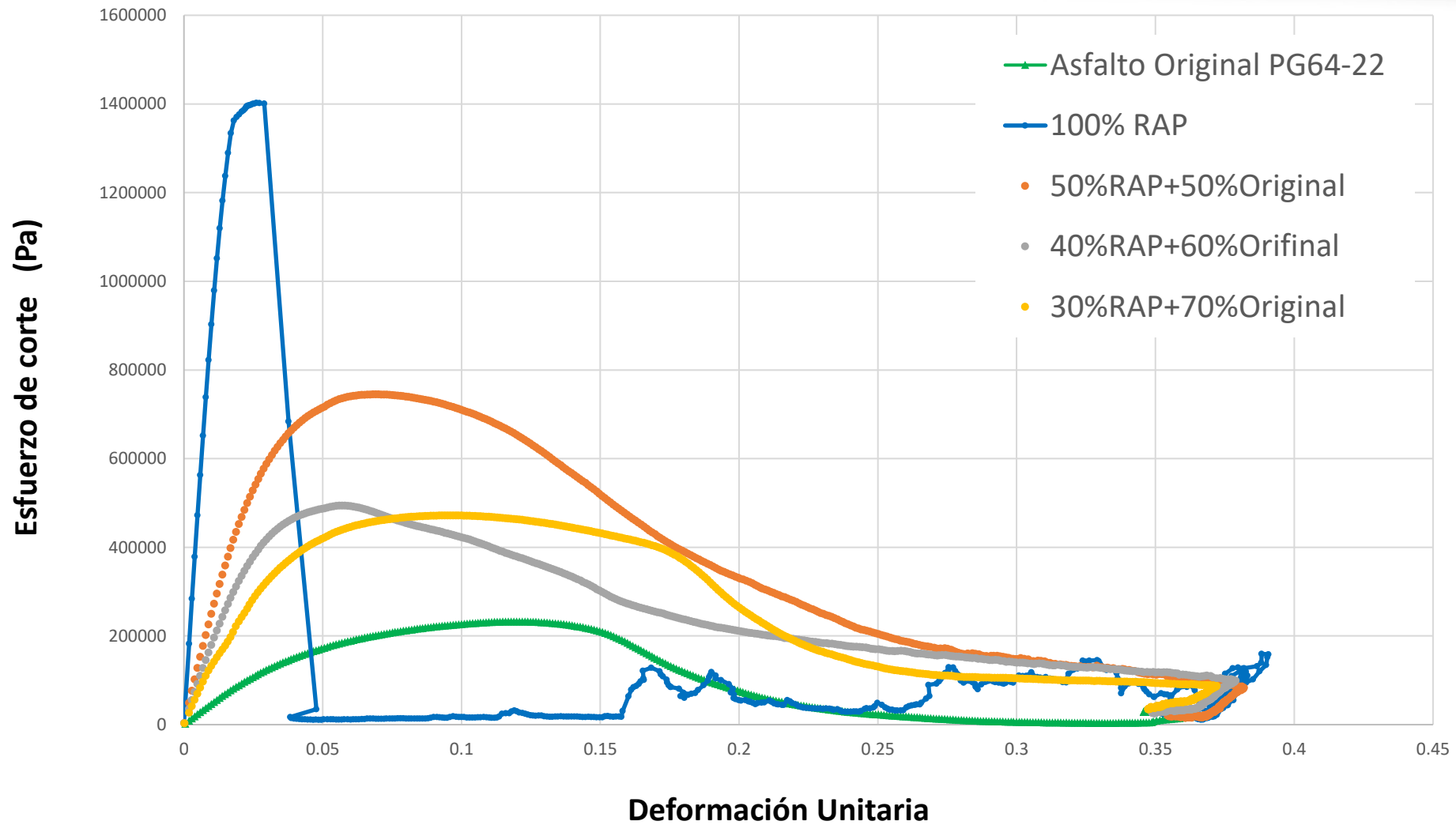
Barrido de deformación del asfalto AC-20 Original, después de RTFO y PAV a 20 °C y 20 Hz



Barrido de deformación del asfalto AC-20 Original, después de RTFO y PAV a 20 °C y 20 Hz

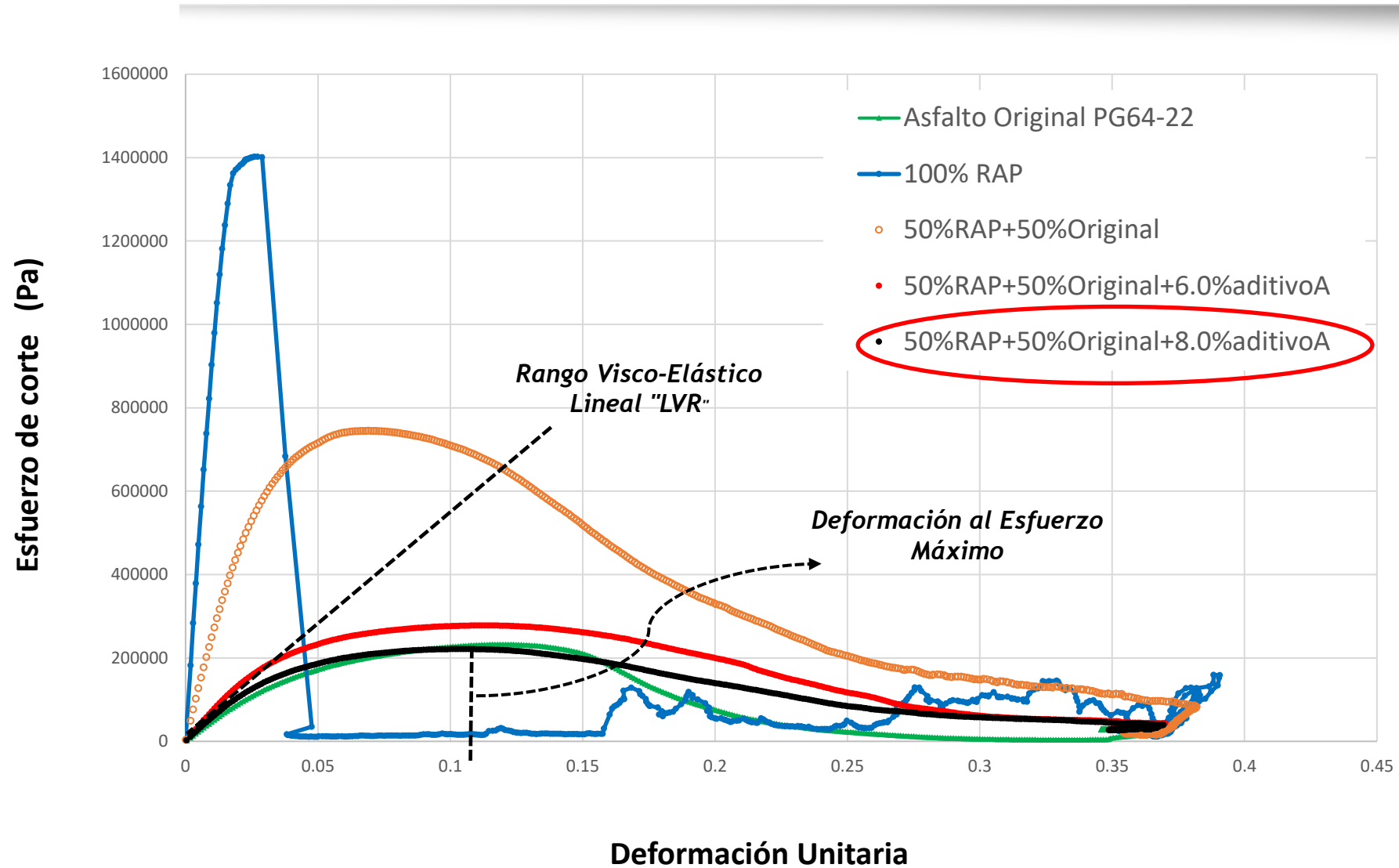


Barrido de deformación del asfalto PG 64-22, Asfalto RAP y mezclas a 20 °C y 20 Hz



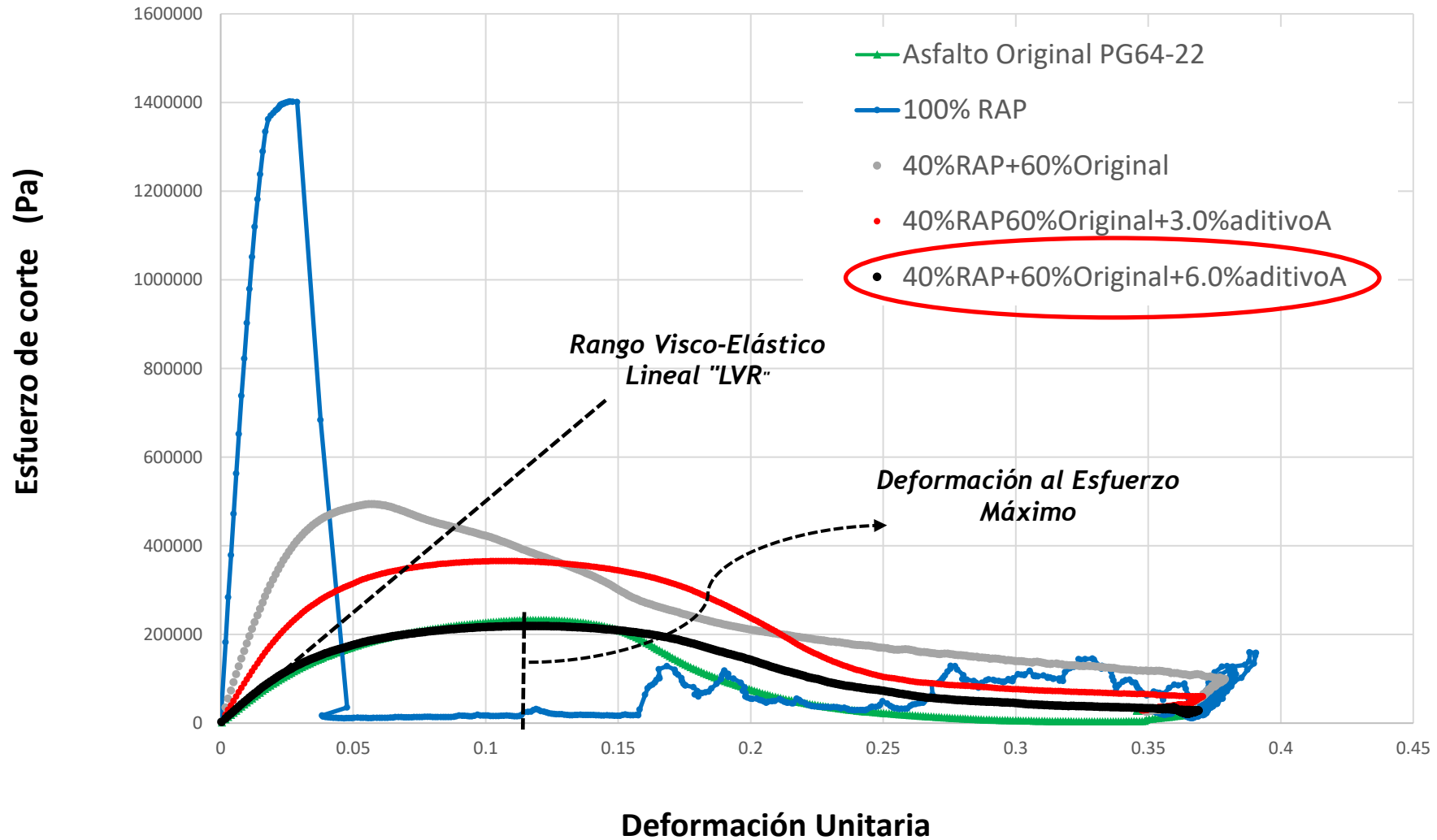
Determinación de la dosis de aditivo rejuvenecedor para la mezcla 50% PG 64-22 con 50% Asfalto RAP

Barrido de deformación a 20° C 20Hz



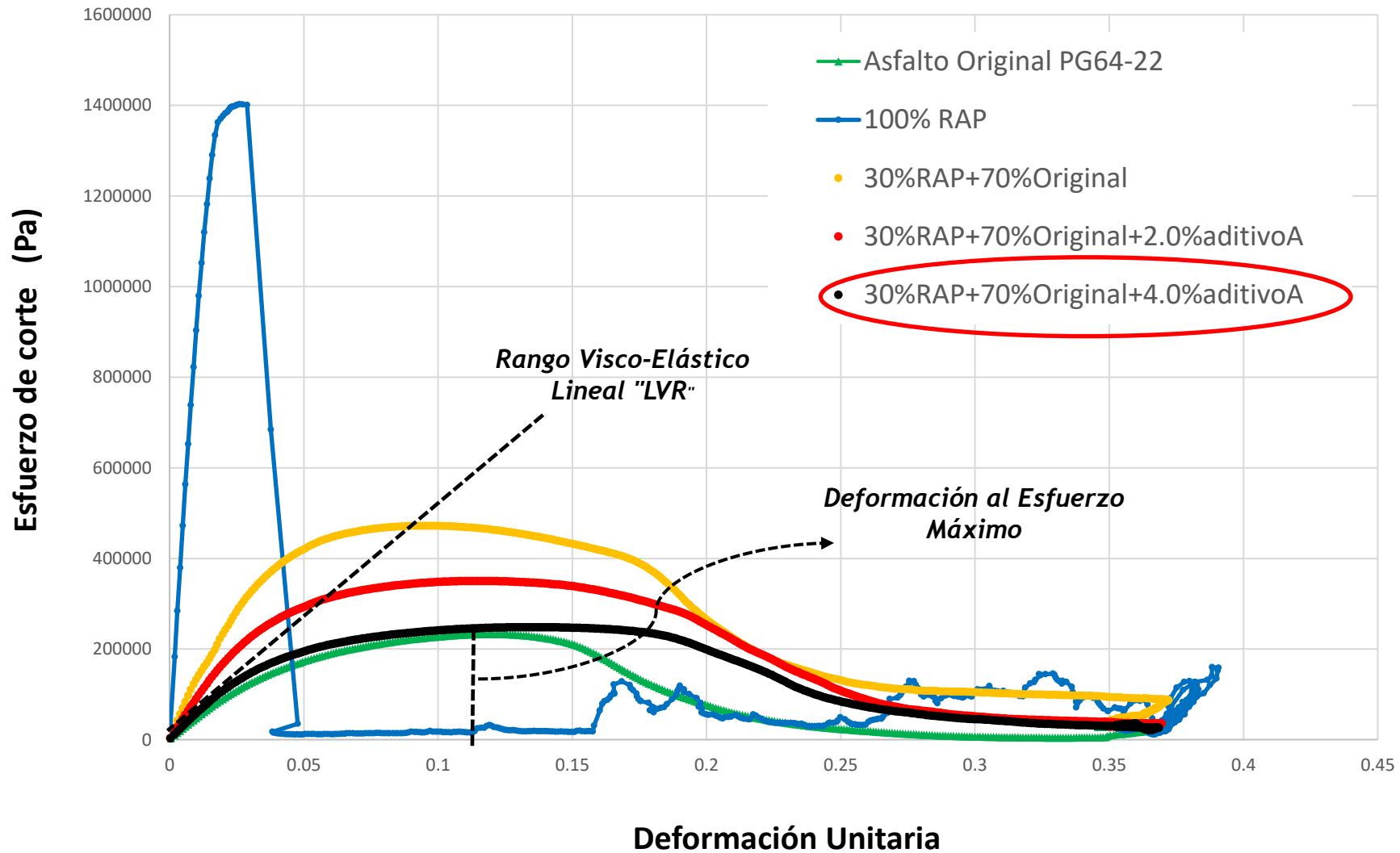
Determinación de la dosis de aditivo rejuvenecedor para la mezcla 60% PG 64-22 con 40% Asfalto RAP

Barrido de deformación a 20° C 20Hz



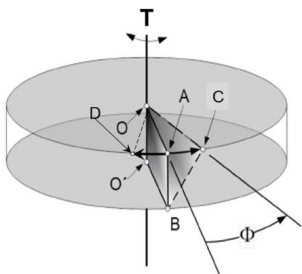
Determinación de la dosis de aditivo rejuvenecedor para la mezcla 70% PG 64-22 con 30% Asfalto RAP

Barrido de deformación a 20° C 20Hz



2. Evaluación de la Resistencia a la Deformación Permanente

Energía de Fluidez Joules/m³



Frecuencia 2 Hz y 60°C



Número de punto	Frecuencia	Temperatura	Módulo de corte complejo	Esfuerzo de corte	Deformación de corte	Hora	Ángulo de cambio de fase	Torque	Estado	Deformación
Componente constante	[Hz]	[°C]	Fundamental	[Pa]	[Pa]	[s]	Fundamental	[mN·m]	Componente constante	sin unidades
1	2	60	4138.121	4.150956	0.1	5	77.17	0.000626	ME-,TruStrain™	0.001
2	2	60	4140.268	8.305657	0.2	10	75.99	0.001252	TruStrain™	0.002
3	2	60	4141.159	12.4274	0.3	15	77.02	0.001873	TruStrain™	0.003
4	2	60	4131.706	16.50926	0.4	20	77.87	0.002489	TruStrain™	0.004
5	2	60	4133.58	20.62942	0.5	25	78.23	0.00311	TruStrain™	0.005
6	2	60	4133.565	24.74223	0.6	30	77.99	0.00373	TruStrain™	0.006
7	2	60	4133.5	28.85462	0.7	35	77.92	0.00435	TruStrain™	0.007
8	2	60	4133.89	32.97085	0.8	40	77.8	0.00497	TruStrain™	0.008
9	2	60	4133.264	37.07847	0.9	45	77.66	0.005589	TruStrain™	0.009
10	2	60	4120.101	41.06011	1	50	77.73	0.006189	TruStrain™	0.01
1001	2	60	422.2077	422.2077	99.01	5005	90.75	0.062631	ME-,TruStrain™	0.999
1002	2	60	422.3955	421.1845	99.71	5010	90	0.063489	ME-,taD,TruStrain™	0.997
1003	2	60	438.0918	437.2739	99.81	5015	90	0.065915	ME-,taD,TruStrain™	0.998
1004	2	60	477.0134	476.5892	99.91	5020	90	0.071841	ME-,taD,TruStrain™	0.999
1005	2	60	492.388	492.4368	100.01	5025	90	0.07423	ME-,taD,TruStrain™	1.000
1006	2	60	437.5921	438.0737	100.11	5030	90	0.066035	ME-,taD,TruStrain™	1.001
1007	2	60	487.3021	488.3171	100.21	5035	90	0.073609	ME-,taD,TruStrain™	1.002
1008	2	60	474.3431	475.8114	100.31	5040	90	0.071724	ME-,taD,TruStrain™	1.003
1009	2	60	388.1079	389.679	100.4	5045	90	0.05874	ME-,taD,TruStrain™	1.004
1010	2	60	515.9246	518.5491	100.51	5050	90	0.078166	ME-,taD,TruStrain™	1.005

Energía de Fluidez Joules/m³

El científico David Roylance del departamento de ciencia e ingeniería de materiales del Instituto Tecnológico de Massachusetts, reporta que la energía de deformación por unidad de volumen de un material estresado es igual a:

$$U^* = \frac{1}{V} \int f dx = \int \frac{f}{A} dx/L = \int \sigma d\epsilon$$

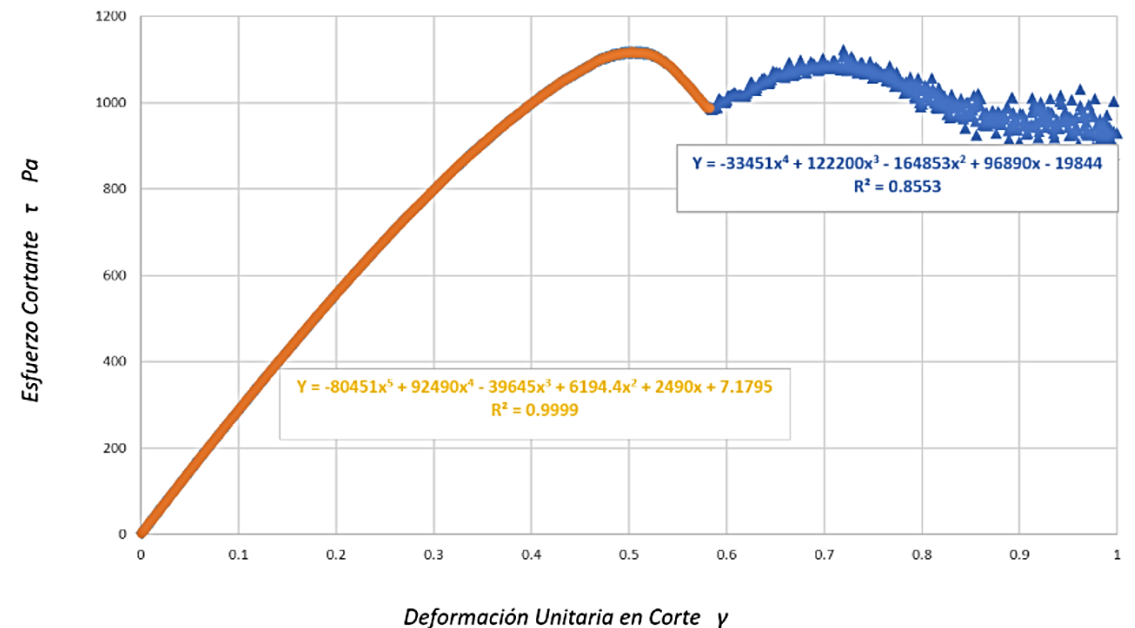
$$\frac{\text{N}}{\text{m}^2} \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}$$

- Geometría = Platos paralelos de 25 mm
- Abertura entre platos (GAP)=1.00 mm Frecuencia = 2 Hertz (12.6 rad/s)
- Rango de deformación: de 0.01mm hasta 1.0mm
- Número total de puntos = 1010
- Ciclos totales=10,100 (cada 10 ciclos se toma una lectura)
- Tiempo total de la prueba= 5,050 segundos
- Temperatura= Temperatura Alta máxima del pavimento

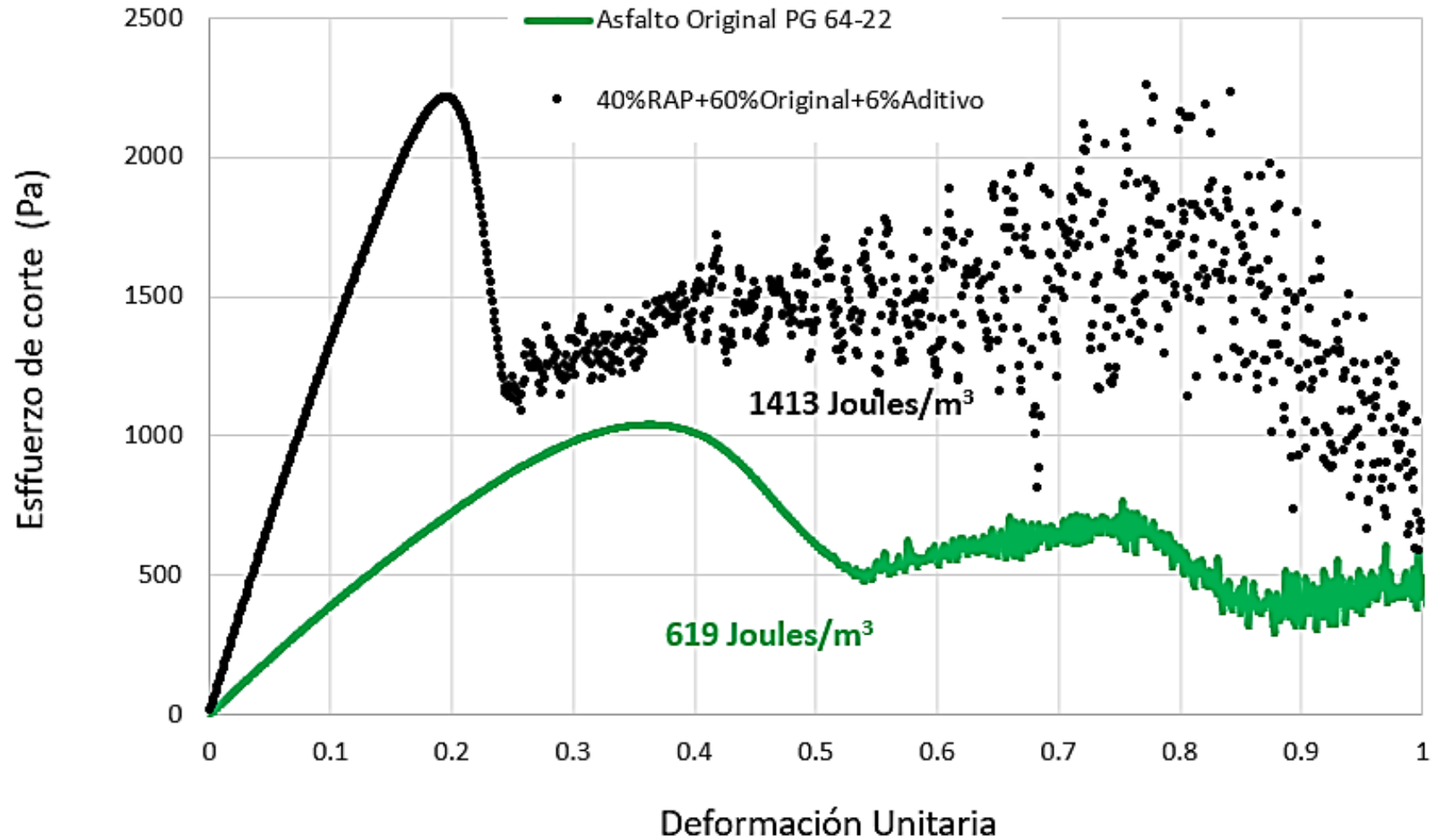
U^* = Energía por unidad de volumen (Joules/m³)

σ = Esfuerzo cortante (Pa)

ϵ = Deformación unitaria



Evaluación de la Energía de Fluidez del asfalto PG64-22 y de la mezcla 60% PG 64-22 con 40% RAP más 6% de aditivo



ENERGÍA DE FLUIDEZ (JOULES/M³) a 60°C

Asfalto Original PG 64-22	619
Asfalto procedente del RAP	17,302
30% RAP + 70% Original	3,368
30% RAP + 70% Original + 4% Aditivo Rejuvenecedor	2,031
40% RAP + 60% Original	3,853
40% RAP + 60% Original + 6% Aditivo Rejuvenecedor	1,413
50% RAP + 50% Original	5,576
50% RAP + 50% Original + 8% Aditivo Rejuvenecedor	3,469

NCHRP

RESEARCH REPORT 927

Evaluating the Effects of Recycling Agents on Asphalt Mixtures with High RAS and RAP Binder Ratios

NATIONAL
COOPERATIVE
HIGHWAY
RESEARCH
PROGRAM

Proposed Standard Practice for

Characterization of Asphalt Mixtures with High Recycled Materials Contents and Recycling Agents

AASHTO Designation: R XX-XX

- 9.1.2 Select the base binder, RBR, and RAP/RAS combination; and calculate PGH of the recycled binder blend using Equation 1:

$$PGH_{Blend} = (RAP_{BR} \times PGH_{RAP}) + (RAS_{BR} \times PGH_{RAS}) + (B_{BR} \times PGH_{Base}) \quad (1)$$

where:

PGH_{Blend} = Continuous PGH of the recycled binder blend (°C);

RAP_{BR} = RAP binder ratio;

PGH_{RAP} = Continuous PGH of the RAP binder (°C);

RAS_{BR} = RAS binder ratio;

PGH_{RAS} = Continuous PGH of the RAS binder (°C);

B_{BR} = Base binder ratio = 1 – RBR; and

PGH_{Base} = Continuous PGH of the base binder (°C).

Note 4 — While accuracy in PGH may be reduced when using Equation 1, it enables consideration of multiple factors with minimal testing. It is recommended to continue to measure PGH of the recycled binder blend, if possible, for design and quality control documentation.

- 9.1.3 Estimate recycling agent dose using Equation 2, for all recycling agent types except petroleum-based aromatic extracts:

$$\text{Recycling Agent (\%)} = (PGH_{Blend} - PGH_{Target}) / 1.82 \quad (2)$$

where:

PGH_{Blend} = Continuous PGH of the recycled binder blend (°C) calculated from Equation 1; and

PGH_{Target} = Continuous PGH of Target Climate.

Conclusiones

- Utilizando este nuevo método es posible calcular la cantidad de aditivo rejuvenecedor que se debe de adicionar para que la mezcla de asfalto original con asfalto del RAP en cualquier proporción tenga el mismo comportamiento que el asfalto original.
- Utilizando este método se determinó que la cantidad de aditivo rejuvenecedor es del 8% para la mezcla de 50% de asfalto PG 64-22 con 50% de asfalto de RAP.
- Utilizando este método se determinó que la cantidad de aditivo rejuvenecedor es del 6% para la mezcla de 60% de asfalto PG 64-22 con 40% de asfalto de RAP.
- Utilizando este método se determinó que la cantidad de aditivo rejuvenecedor es del 4% para la mezcla de 70% de asfalto PG 64-22 con 30% de asfalto de RAP.
- Con la determinación de la cantidad de aditivo rejuvenecedor proporcionada por este método se asegura un comportamiento del asfalto resistente a la fisuración por fatiga y resistente a la deformación permanente.

¡muchas gracias!

Ponente: Álvaro Gutiérrez Muñiz

Contacto: agutierrez@kao.com

KAO

Kirei – Making Life Beautiful