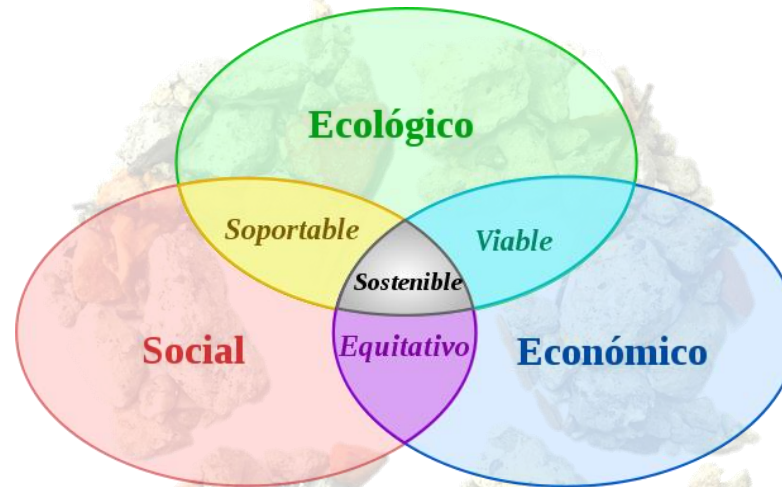


# APLICACIÓN SOSTENIBLE DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN COMO ÁRIDO RECICLADO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO

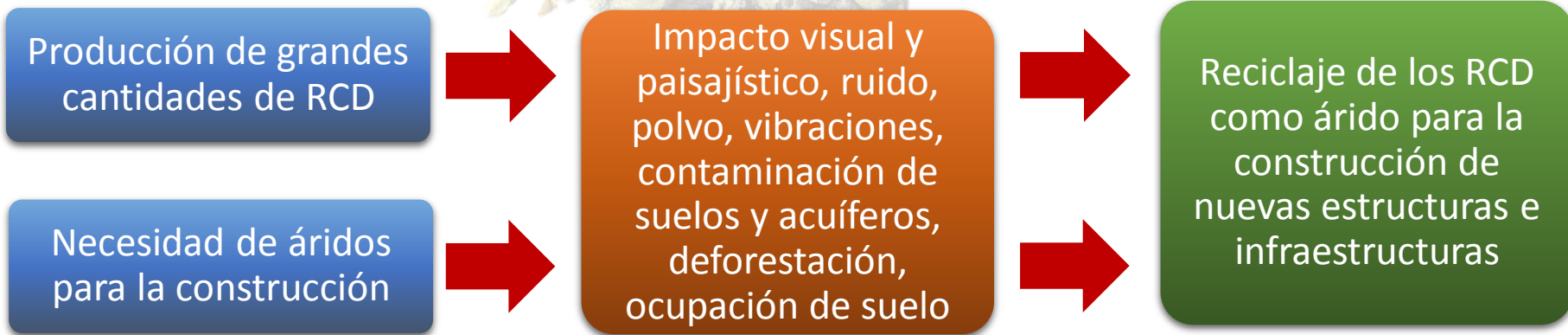
Breixo Gómez Meijide  
Ignacio Pérez Pérez



- *“Satisfacer las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades”*



- En el marco de la ingeniería civil:



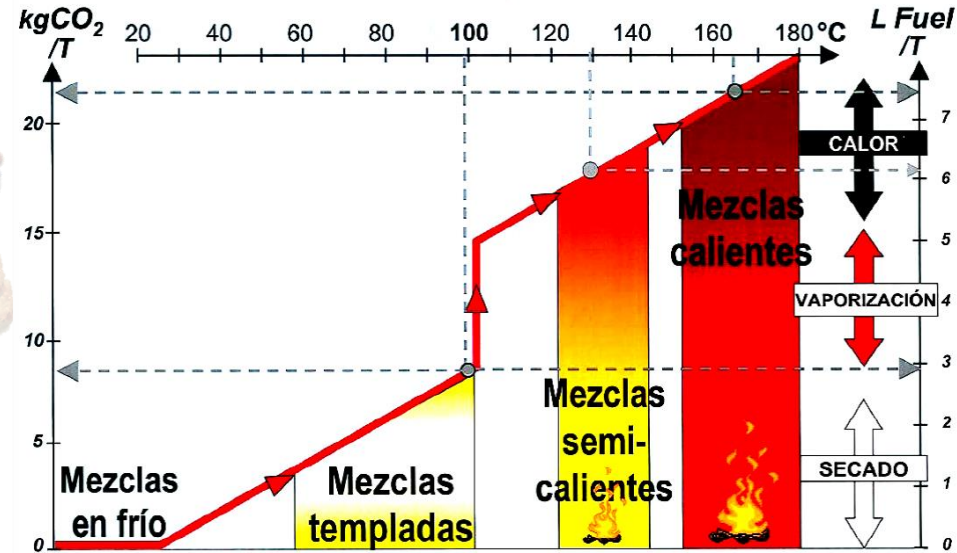
- Evolución en la Legislación y Normativa
  - Según el PNIR:
    - En 2012: reciclaje del **25%** de los RCD y valorización de un **15%** adicional
    - En 2015: reciclaje del **35%** de los RCD y valorización de un **20%** adicional
  - Según Directiva Marco de Residuos:
    - En 2020: valorización de **70%** de la fracción no peligrosa de los RCD
- Evolución de la tecnología del reciclado en ingeniería civil



• Comparación con las mezclas bituminosas en caliente

Necesidad de curado  
Peores resistencias  
Baja rigidez  
Contenido de huecos

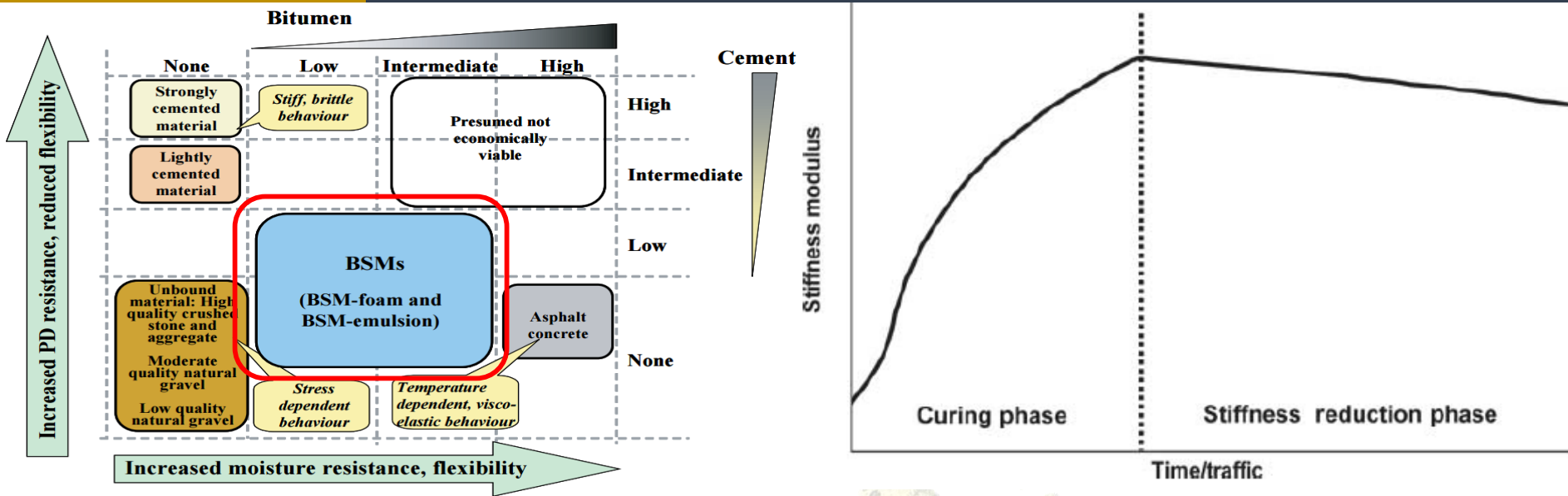
Impacto ambiental  
Ahorro energético  
Almacenables  
Flexibilidad



### OBJETIVO FUNDAMENTAL

Aplicación sostenible de los residuos de construcción y demolición como áridos reciclados de mezclas bituminosas en frío

- Elaborar un estado del arte sobre la utilización de RCD en mezclas en frío
- Caracterización de los RCD como áridos y compararlos con los naturales
- Desarrollar un método de fabricación para obtención de probetas con idénticas propiedades intrínsecas
- Determinar las propiedades de las mezclas en frío con RCD y compararlas con mezclas convencionales con AN
- Establecer criterios de diseño, recomendaciones y limitaciones para el uso de RCD en mezclas en frío



- Jenkins et al. (2007): *material visco-elasto-plástico complejo con características anisótropas*
- Comportamiento dependiente de:
  - ➔ Nivel de esfuerzo (elástico no lineal)
  - ➔ Temperatura y frecuencia (visco-elástico)
- Ebels (2008) y Jenkins and Yu (2009): *en las etapas tempranas de maduración es cuando estas mezclas acentúan su comportamiento elástico no lineal (asemejándose al de un material granular), mientras que en la segunda fase es cuando se acentúan más sus características visco-elasto-plásticas (más propias de las mezclas bituminosas en caliente)*

- Residuos que surgen de las actividades de construcción, renovación y demolición, incluyendo excavaciones y demás movimientos de tierras, construcciones civiles y de edificación, trabajos de limpieza, demoliciones, obras de carreteras y restauración de edificios (Shen et al., 2004)
- Suelen estar compuestos por diferentes materiales como betún, cerámica, hormigón y mortero, áridos naturales, yeso e impurezas (madera, vidrio, plástico, metal, etc.) (Jiménez et al., 2011).

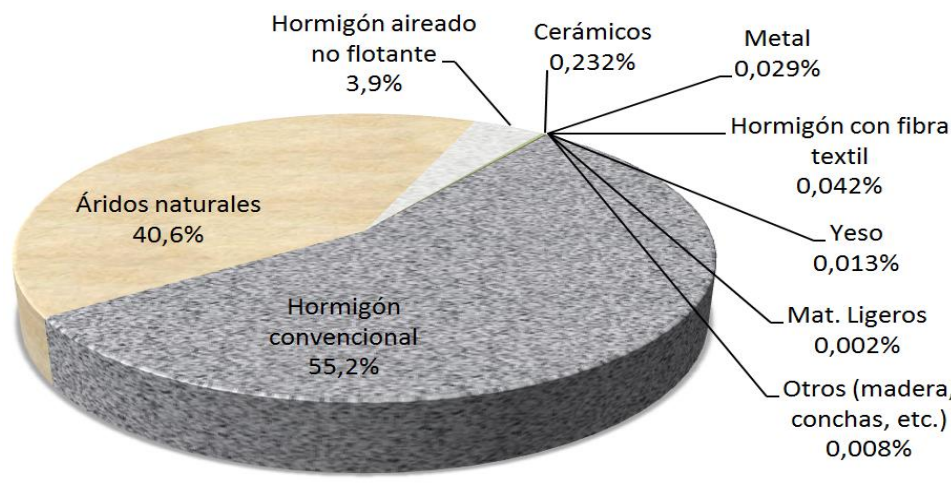
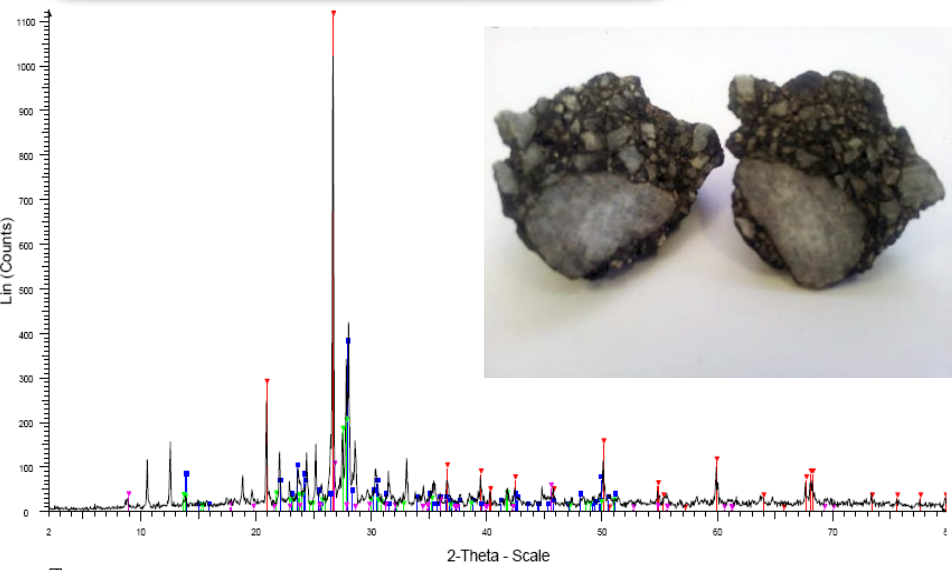
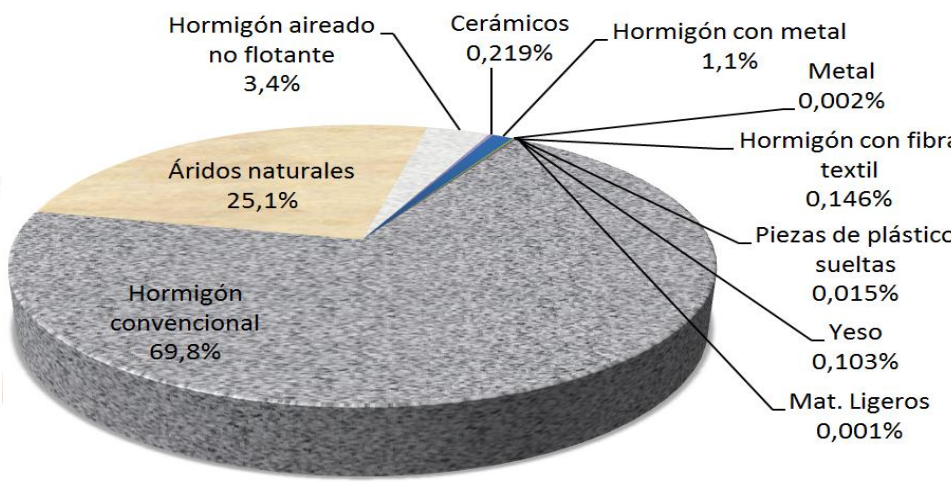


- La composición del árido reciclado afecta en gran medida á sus propiedades como árido y a la de las mezclas fabricadas con los mismos
- En términos generales, las mezclas con RCD:
  - Mayor contenido de huecos rellenos de aire
  - Menor contenido de huecos rellenos de betún y espacio intergranular (VMA)
  - Menores densidades
  - Mayores contenidos óptimos de betún
  - Mayor flexibilidad y resistencia a fisuración a bajas temperaturas
  - Mayor sensibilidad al agua (se reduce con pretratamientos)
  - ¿Menor resistencia a tracción indirecta?
  - ¿Menor rigidez y módulo dinámico?
  - No está claro el efecto sobre la resistencia a la deformación permanente
  - ¿Peor resistencia a fatiga?
  - No existen estudios pero se intuye que peor resistencia al deslizamiento



# CARACTERIZACIÓN DE LOS ÁRIDOS

# Composición del árido reciclado de RCD



1\_raw - File: 1\_raw.raw - Type: 2Th/Th locked - Start: 2.000 ° - End: 80.000 ° - Step: 0.050 ° - Step time: 2.5 s - Temp.: 25 °C (Room) - Time Started: 10 s - 2-Theta: 2.000 ° - Theta: 1.000 ° - Chi: 0.00 ° - Phi: 0.00 ° - X  
 Operations: Import  
 78-2315 (C) - Quartz - SiO2  
 79-2456 (F) - Albite, ordered - NaAl3Si3O8  
 59-0478 (I) - Anorthoclase, disordered - (Na,K)(Si3Al)O8  
 46-1429 (I) - Muscovite-2 ITM RIG1, vanadate barian - (K,Ba,Na)0.75(Al,Mg,Cr,V)2(Si,Al,V)4O10(OH,OH)2

- Gran absorción debido al mortero. Hasta 15 veces superior al AN
- Baja densidad. Hasta un 23% inferior al AN
- Tiende a producir la prematura rotura de la emulsión
  - → Emulsión rotura lenta
  - → Mayor
- Índice de lajas, caras de fractura, equivalente de arena y azul de metileno cumplieron los requisitos establecidos para categorías T2, T3 y T4, según:
  - PG-3: Artículo de mezclas bituminosas en caliente
  - PG-3: Artículo de grava-emulsiones (derogado)
  - PG-3: Artículo de mezclas bituminosas en frío (derogado)
  - Pliegos ATEB
- Como árido destaca el alto Coeficiente de Los Angeles, solo apto para carreteras de muy bajo tráfico
- Inestabilidad granulométrica → Aumento de finos durante compactación

- Dado que no existen investigaciones sobre ningún otro tipo de mezcla en frío con RCD, se creyó conveniente iniciar dicha línea de investigación con el empleo de un tipo de mezcla que:
  - Sea lo más versátil posible para diferentes usos y tipos de capa
  - No sea específica para capas de rodadura por baja resistencia al pulimento de los RCD
  - Que ofrezca buenos comportamientos estructurales (mezclas densas)
  - Que se usen en capas gruesas del firme para reciclar más RCD (bases/subbases)
  - Que aprovechen todas las fracciones granulométricas (mezclas continuas)

### Grava-emulsión

### Características y propiedades

Granulometría continua con esqueleto mineral similar a ZA

El mortero rico en ligante proporciona cohesión y flexibilidad

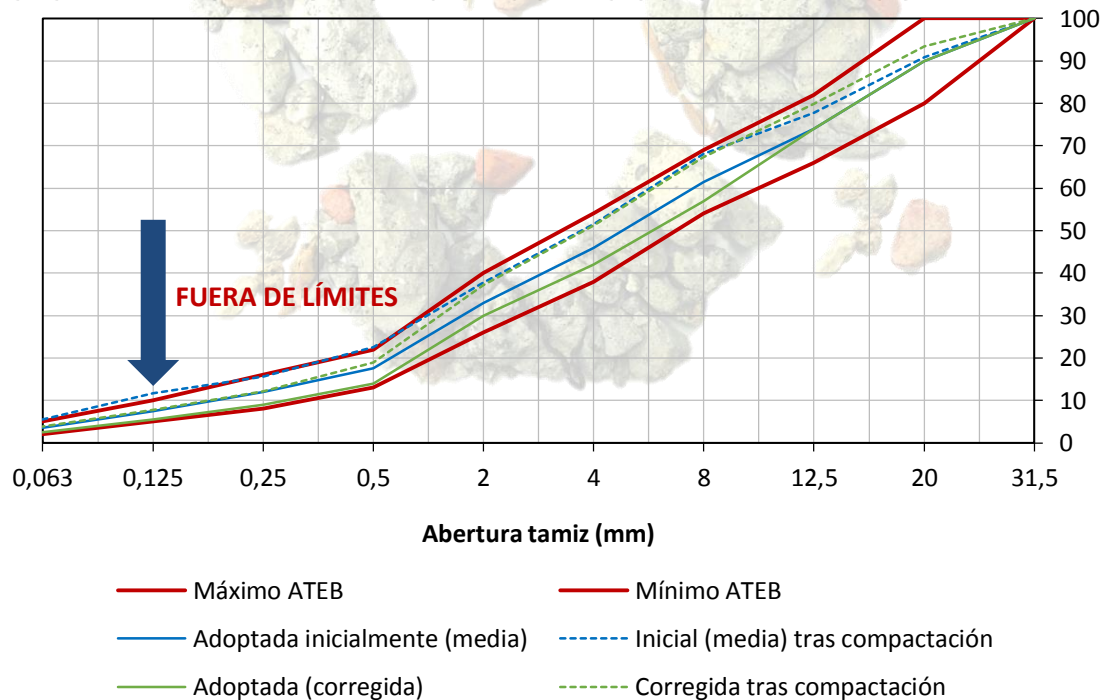
Tras compactación y curado, buenas propiedades estructurales

Suele emplearse en capas inferiores de base y subbase

Refuerzos, anti-remonte de fisuras, regularizaciones, reparaciones



- Granulometría compuesta manualmente
- Según los Pliegos Técnicos de la ATEB para grava-emulsiones:
  - GE1 para categorías de tráfico T3 o superiores
  - GE2 para categorías inferiores
  - GE3 solo para IMDp < 10 veh/día
- Curva ajustada al límite inferior de las fracciones finas



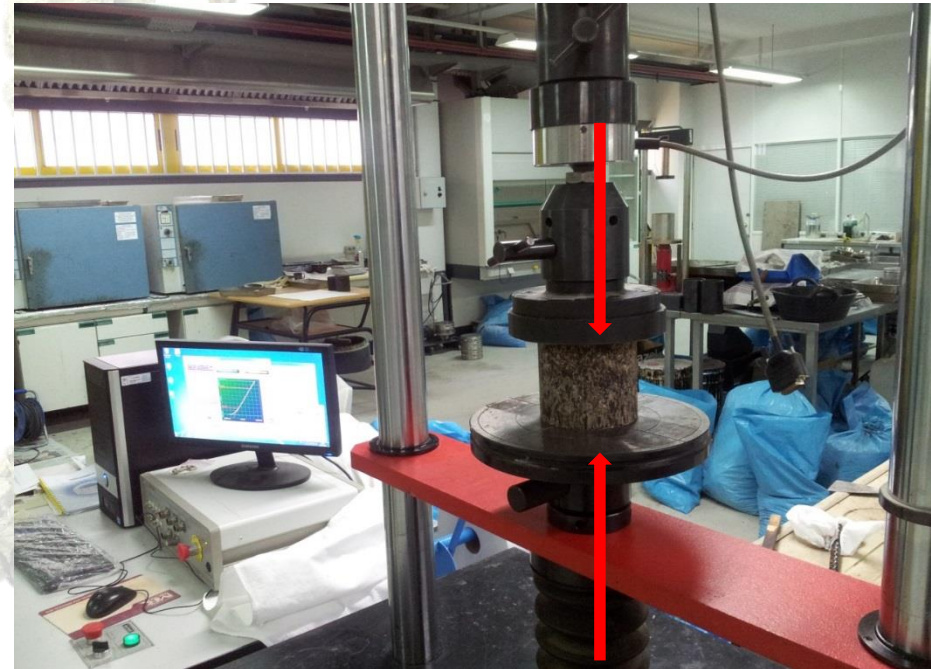
- Medida indirecta de la capacidad de un ligante para adherirse a los diferentes áridos empleados a lo largo de la tesis
- Indicador de la susceptibilidad de la mezcla al descubrimiento del árido o *stripping*
- Botella giratoria (UNE-EN 12697-11)
  - Inspección visual del grado de recubrimiento de ligante sobre el árido sin compactar tras ser sometido a una agitación mecánica en presencia de agua durante 6h y 24h
- Boiling Water Test (ASTM D 3625)
  - Inspección visual del grado de recubrimiento del árido tras sumergir la mezcla sin compactar en agua hirviendo durante 10 minutos

Árido	Botella giratoria			Boiling water test			
	Betún	Agua	Curado	Betún	Agua	Curado	
Reciclado	5%	9%	3 días	5%	9%	3 días	
		12%			12%		
		15%			15%		
		18%			18%		
	3%	15%	3 días	3%	15%	3 días	
							4%
							5%
	5%	15%	0 días	5%	15%	0 días	
			3 días			3 días	
			7 días			7 días	
	Natural	4%	3%	3 días	4%	3%	3 días
			6%			6%	
9%			9%				
12%			12%				
2%		3%	3 días	2%	3%	3 días	
							3%
							4%
							5%
4%		3%	0 días	4%	3%	0 días	
			3 días			3 días	
			7 días			7 días	

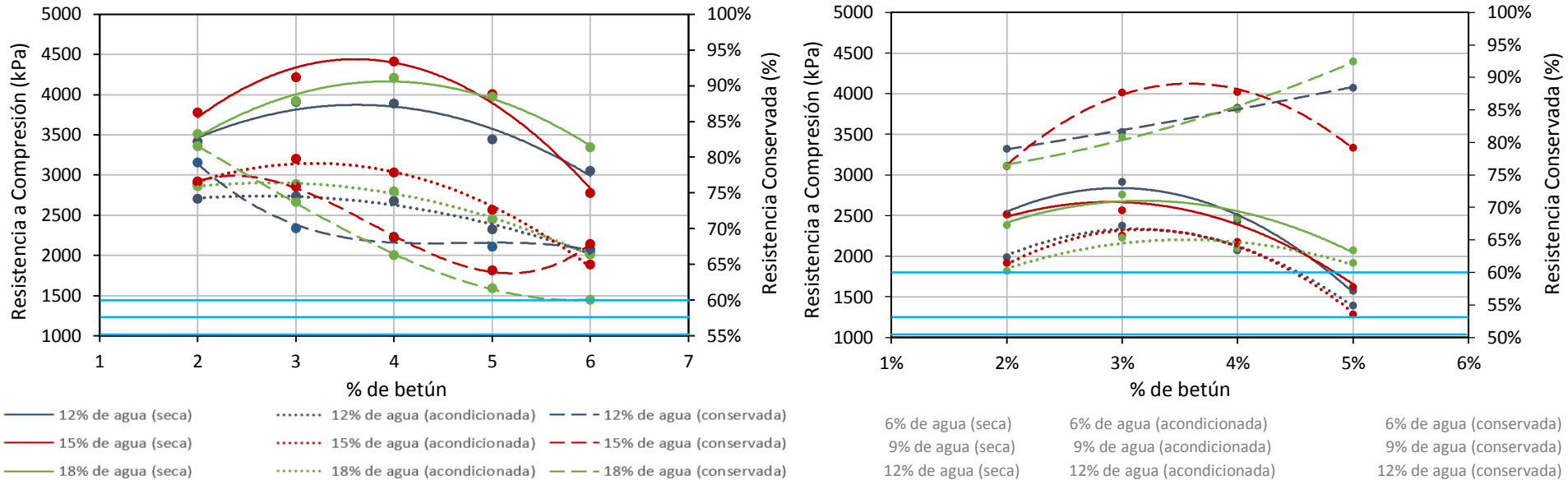


- Los ensayos de botella giratoria y Boiling Water Test, mostraron que:
  - Los RCD tienen en general una menor afinidad con el ligante pudiendo reducir la resistencia al descubrimiento del árido
  - Esta afinidad mejora cuando la mezcla con RCD se enriquece en contenido de ligante pero aun así sin llegar nunca a los valores observados con el árido natural
  - Con mayores contenidos de agua no se consiguió mejorar los recubrimientos de las partículas (afinidad pasiva) pero sí se redujeron los tiempos de mezclado necesarios para conseguir la envuelta total (afinidad activa)

- 10 probetas
    - 5 grupo húmedo
    - 5 grupo seco
- $$IRC (\%) = \frac{R_2}{R_1} \cdot 100$$



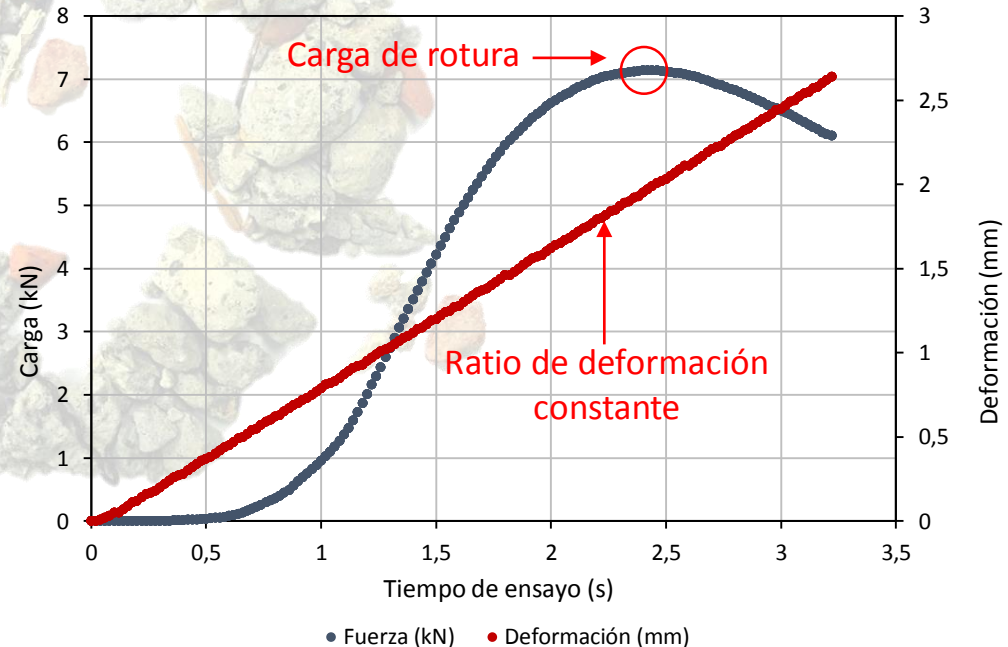
Acondicionamiento: 49°C durante 4 días



- Se satisfacen todos los límites establecidos por la ATEB y el antiguo PG-3
- Resistencias seca y húmeda mayores en mezclas con RCD
  - Máximos con AN: 2914,9 kPa y 2379,6 kPa
  - Máximos con RCD: 4411,6 kPa y 3197,7 kPa (mejora del 51,3% y 34,3%)
- Resistencia conservada menor (máxima de 81,5% frente a 92,5%)
  - Debido a que la resistencia seca aumenta más que la húmeda
  - Resistencia húmeda con RCD mayor que resistencia seca con AN
- Necesidad de mayores contenidos de agua y betún al emplear RCD

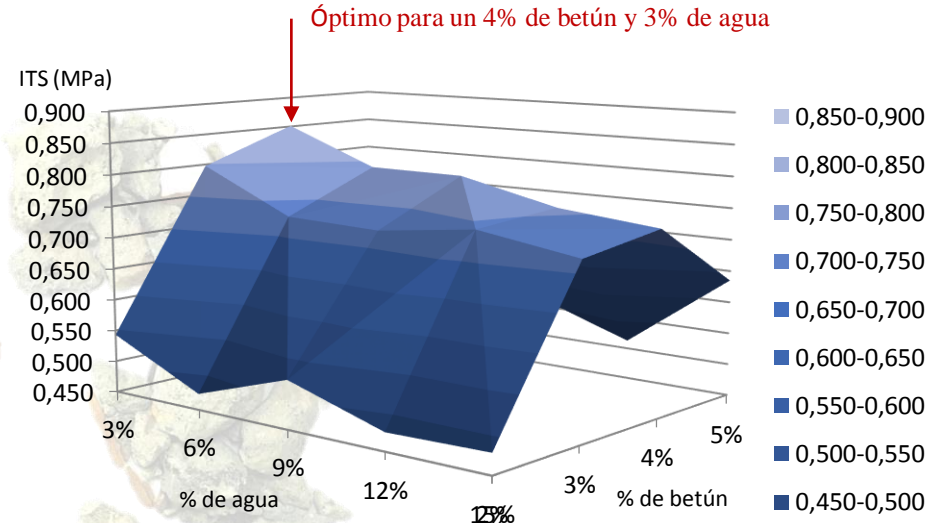
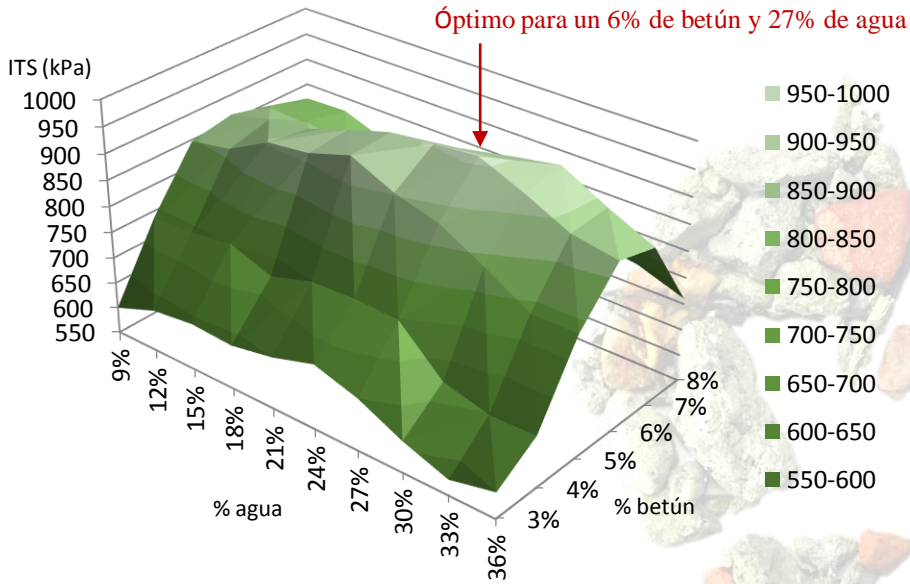


- 120 ensayos con RCD y 63 con AN en grupos de 5 y 3 probetas respectivamente
  - Temperatura de ensayo 25°C
  - Aplicación de carga diametral
  - Ratio de deformación constante (50±2 mm/min) hasta rotura



- La resistencia a tracción indirecta se calcula mediante la expresión  $\longrightarrow ITS = \frac{2 P}{\pi D H}$

# Resistencia a tracción indirecta (ITS)



% de agua de amasada según peso de árido seco										
% de betún	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%
3%	602	634	646	635	652	671	652	619	587	606
4%	738	740	752	723	748	751	748	670	648	655
5%	847	862	904	914	940	903	880	835	785	784
6%	862	881	892	920	944	952	960	925	885	868
7%	843	841	829	825	860	901	920	935	890	858
8%	821	824	795	747	745	767	777	753	745	713

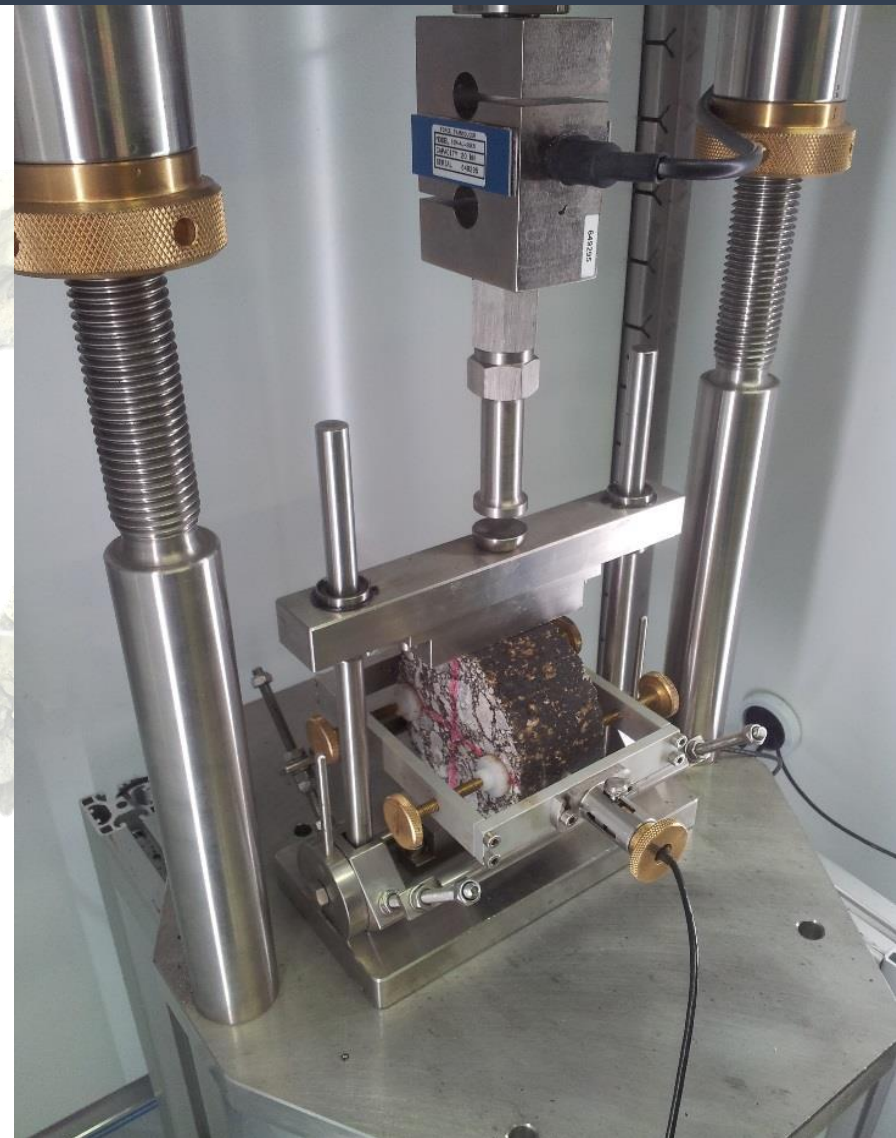
% de betún	% de agua según peso de árido seco				
	3%	6%	9%	12%	15%
2%	543	475	525	478	482
3%	798	729	724	743	719
4%	851	792	791	755	739
5%	690	485	567	513	635

La mezcla con RCD al 5% de betún necesita un 1,1% más de betún para el mismo tramo unitario de carretera (no un 25% más) que la mezcla con AN al 4%

- Se ensayaron las parejas gemelas de las probetas de tracción indirecta
- 10 pulsos de acondicionamiento
- 5 pulsos de carga para ensayo
  - 3 segundos por ciclo
  - 124 ms de subida
  - Resto de reposo
- Se calcula media de los 5 ciclos:

$$S_m = \frac{F (\vartheta + 0,27)}{z \cdot h}$$

- Se repite con el diámetro perpendicular
- 5 probetas para RCD y 3 para AN
- El Módulo Resiliente es la media total
- Temperaturas de ensayo: 2, 10 y 20°C
- Se asume  $\nu = 0,35$



% betún	% agua en mezcla									
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%

### ITSM at T=2°C

3%	3256	4567	4551	4114	4944	6009	5993	5911	5839	5820
4%	4990	6010	6493	5900	6228	6592	6493	6433	6352	6434
5%	6486	7586	7606	7738	7740	7485	7058	6976	6822	6957
6%	7512	7461	7374	7731	7859	7959	8010	7560	7531	7545
7%	7532	7325	7140	7023	6851	7412	8019	8407	7611	7518
8%	7251	7140	6723	6359	6082	6234	7385	7480	7105	6689

### ITSM at T=10°C

3%	3132	4022	4201	3496	3887	4811	5064	4808	4679	4552
4%	3805	4654	4912	4659	4895	5284	5102	5094	5063	4989
5%	4610	5670	5889	5890	5831	5880	5530	5392	5402	5410
6%	4254	5813	5448	5950	6007	5980	6010	5941	5693	5607
7%	5778	5468	5153	5199	5105	5170	5492	6044	5741	5599
8%	5632	5254	4790	4506	4220	4400	4717	5015	4913	4720

### ITSM at T=20°C

3%	2379	2622	2490	2710	3043	3312	3596	3566	3558	3570
4%	2741	3013	3318	3182	3380	3595	3667	3657	3601	3583
5%	3024	3723	4024	3854	3912	4001	3766	3640	3618	3553
6%	3515	3642	3418	3866	3896	3786	4006	3799	3586	3451
7%	3403	3321	2844	2987	3079	2983	3421	3812	3490	3213
8%	3288	2837	2668	2394	2311	2269	2565	2707	2724	2526

% de betún	% de agua según peso de árido seco									
	9%	12%	15%	18%	21%	24%	27%	30%	33%	36%
3%	26.9%	42.6%	45.3%	34.1%	38.5%	44.9%	40.0%	39.7%	39.1%	38.7%
4%	45.1%	49.9%	48.9%	46.1%	45.7%	45.5%	43.5%	43.2%	43.3%	44.3%
5%	53.4%	50.9%	47.1%	50.2%	49.5%	46.5%	46.6%	47.8%	47.0%	48.9%
6%	53.2%	51.2%	53.6%	50.0%	50.4%	52.4%	50.0%	49.7%	52.4%	54.3%
7%	54.8%	54.7%	60.2%	57.5%	55.1%	59.8%	57.3%	54.7%	54.1%	57.3%
8%	54.7%	60.3%	60.3%	62.4%	62.0%	63.6%	65.3%	63.8%	61.7%	62.2%

% betún	% agua en mezcla				
	3%	6%	9%	12%	15%

### ITSM at T=2°C

2%	6892	5980	5938	6528	6471
3%	9821	10431	9375	9560	9852
4%	11096	10184	9521	8810	10004
5%	8303	6189	5777	6905	8939

### ITSM at T=10°C

2%	4203	3608	3478	3784	3944
3%	5457	5882	5529	5684	5602
4%	6230	5678	5495	4918	5699
5%	4404	3167	2954	3751	5059

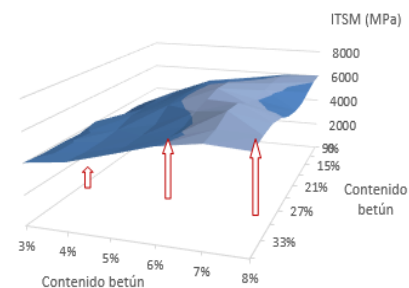
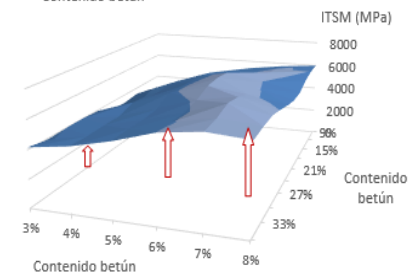
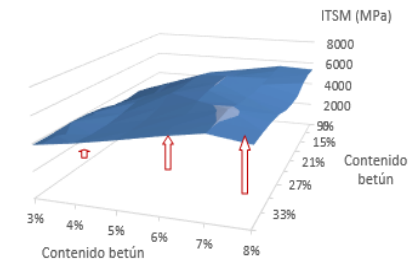
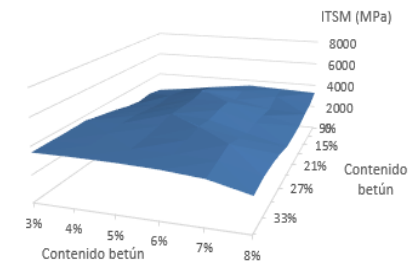
### ITSM at T=20°C

2%	1844	1619	1387	1469	1691
3%	2351	2298	2137	2308	2374
4%	2537	2197	2137	1795	2184
5%	1459	963	931	1310	1850

% de betún	% de agua según peso de árido seco				
	3%	6%	9%	12%	15%
2%	73,2%	72,9%	76,6%	77,5%	73,9%
3%	76,1%	78,0%	77,2%	75,9%	75,9%
4%	77,1%	78,4%	77,6%	79,6%	78,2%
5%	82,4%	84,4%	83,9%	81,0%	79,3%



- Para ambos tipos de árido, el crecimiento duró 12 meses y alcanzó valores de hasta el 150%
- Las mezclas con RCD siguen siendo más rígidas a 20°C
- Crecimientos mayores cuanto mayor es el contenido de betún: el óptimo cambia
- La pérdida de peso de las probetas finaliza antes que el crecimiento de la rigidez. Además no depende del contenido de agua pero sí del contenido de betún

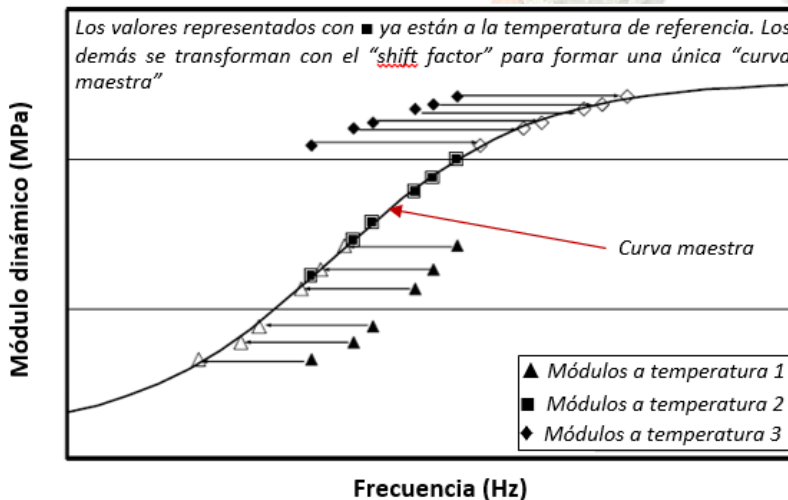


- Las probetas se compactaron con compactador giratorio
  - 250 revoluciones para alcanzar densidad y huecos objetivo
  - El contenido de agua era superior tras compactación pero igual tras curado
- El ensayo se realizó con las mismas probetas a 2°C, 20°C y 40°C
- Cada ensayo se realizó a 25\*Hz - 25 Hz - 10 Hz - 5 Hz - 1Hz - 0,5 Hz - 0,1 Hz

- Módulo a tracción indirecta

$$|E^*| = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0 \cdot \cos \beta_t}{\varepsilon_0}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0 \cdot \sin \beta_\varepsilon}{\varepsilon_0}\right)^2} = \frac{\sigma_0}{\varepsilon_0}$$

$$|ITE^*| = \frac{F (\vartheta + 0,27)}{z \cdot h}$$

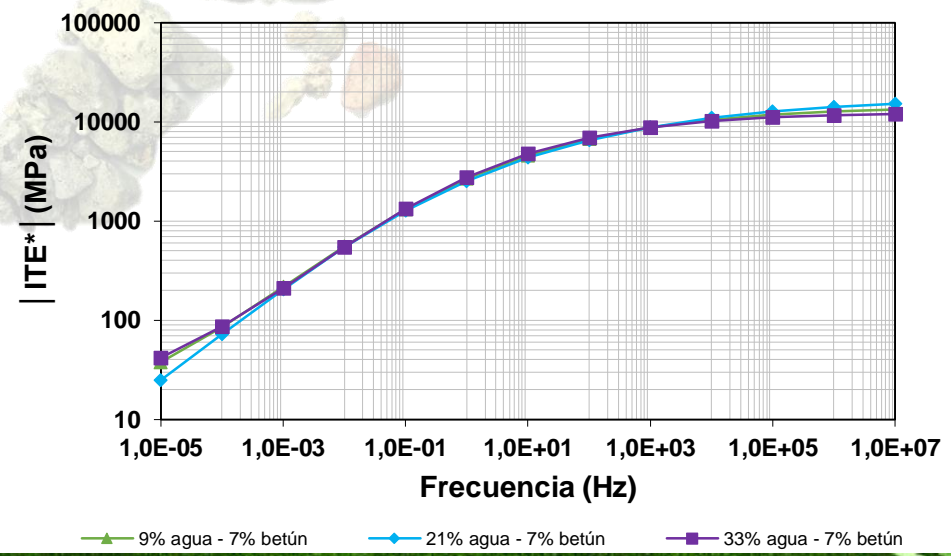
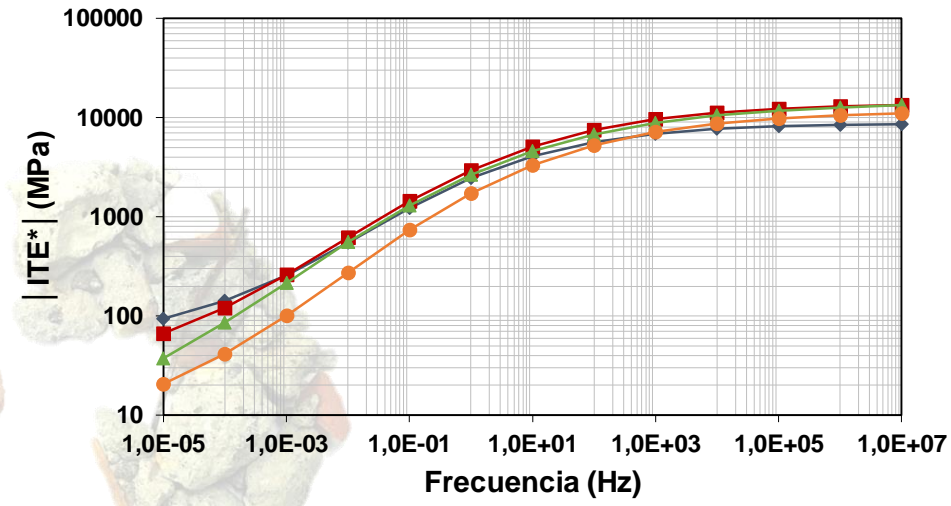
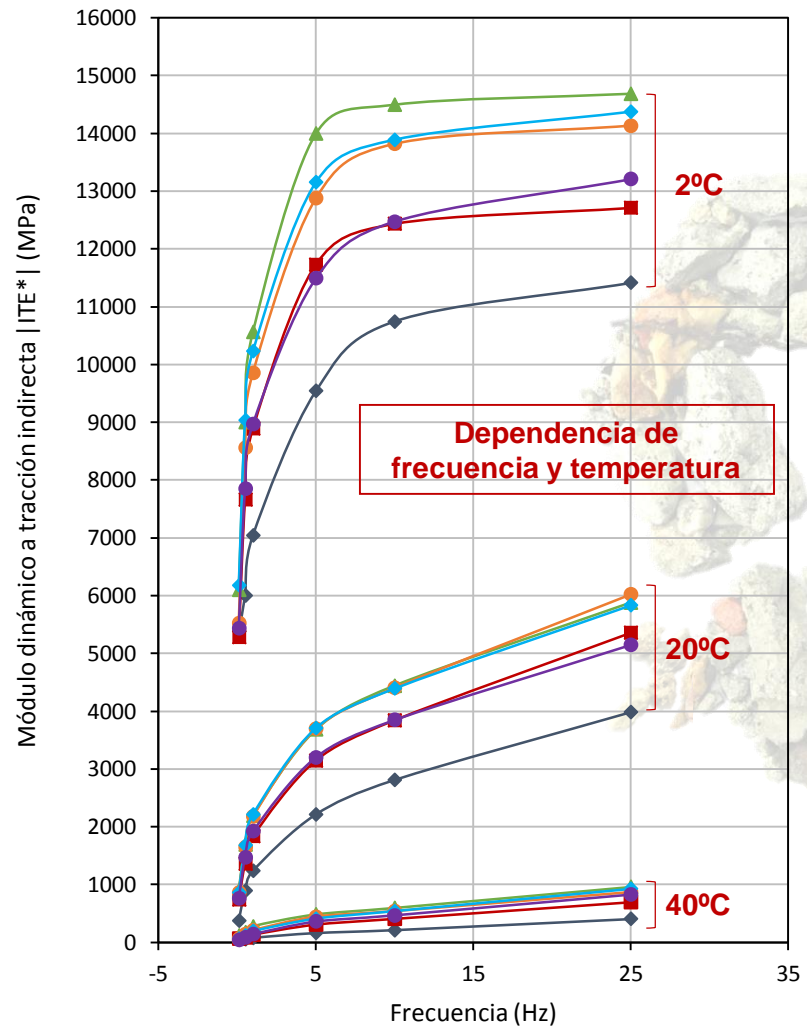


$$\log|E^*| = \delta + \frac{\alpha}{1 + e^{\beta + \gamma(\log t_r)}}$$

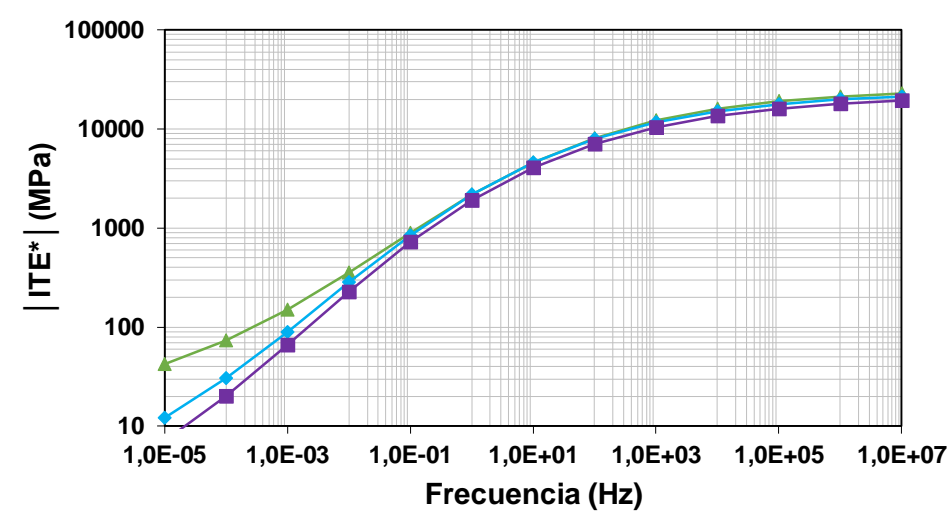
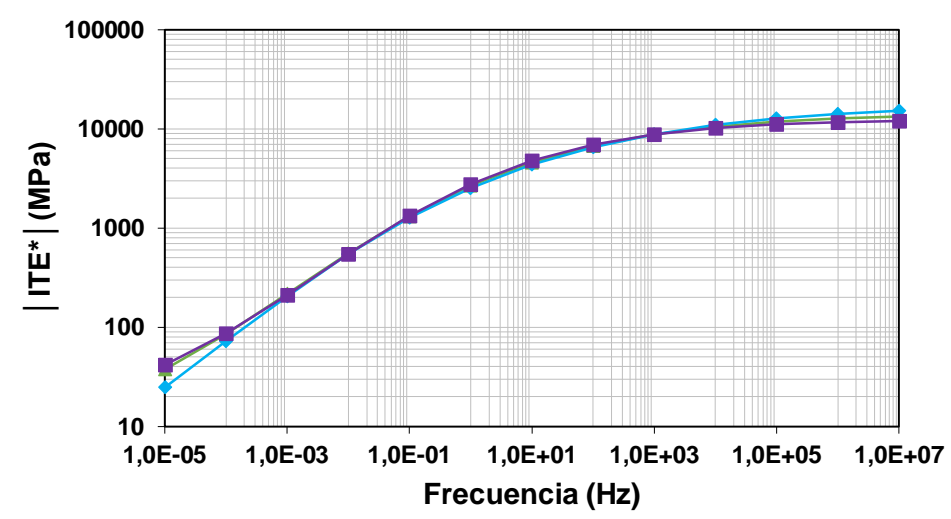
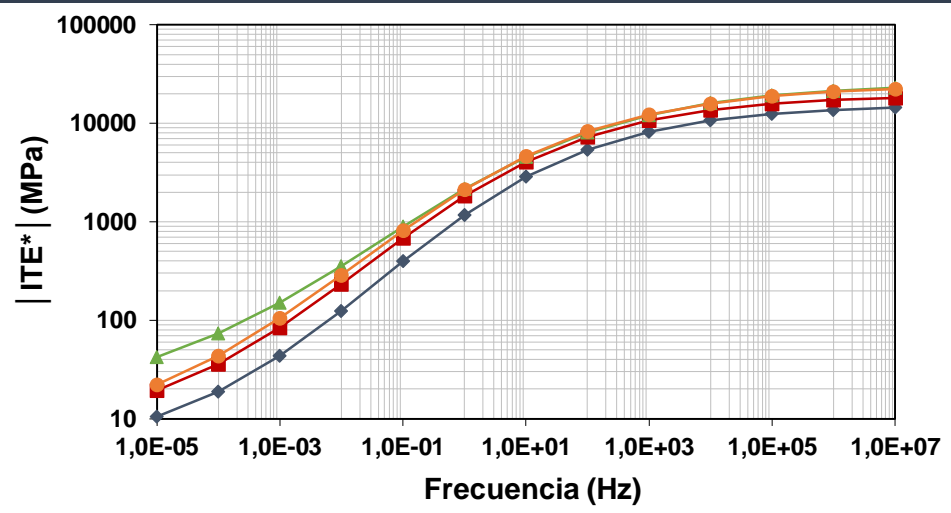
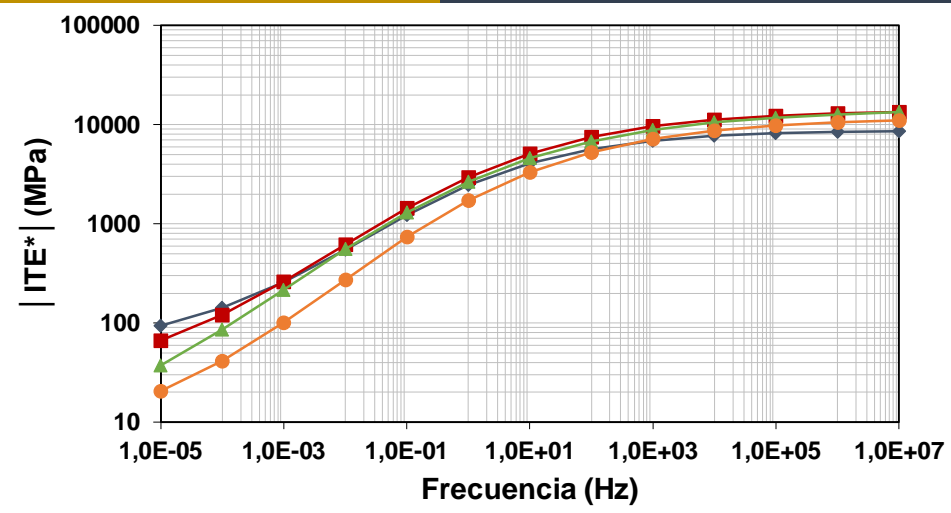
$$a(T) = \frac{t}{t_r}$$

$$\log a(T_i) = a T_i^2 + b T_i + c$$

# Módulo dinámico |ITE\*|

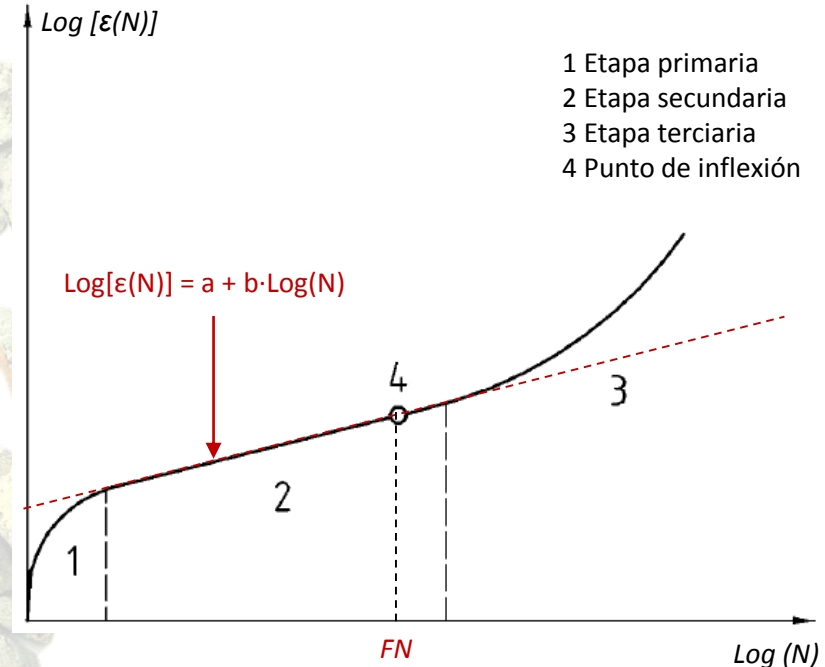


- 3% agua - 2% betún
- 3% agua - 3% betún
- 3% agua - 4% betún
- 3% agua - 5% betún
- 9% agua - 4% betún
- 15% agua - 4% betún
- 9% agua - 7% betún
- 21% agua - 7% betún
- 33% agua - 7% betún



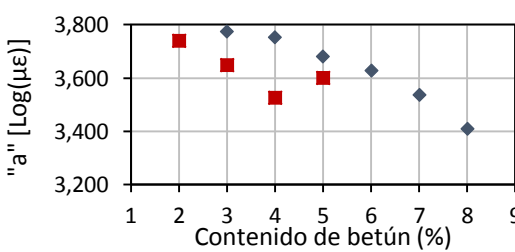
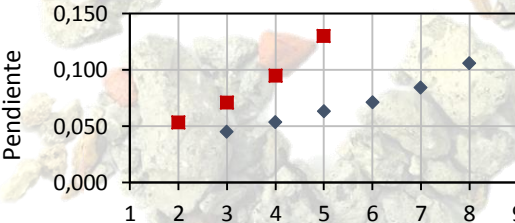
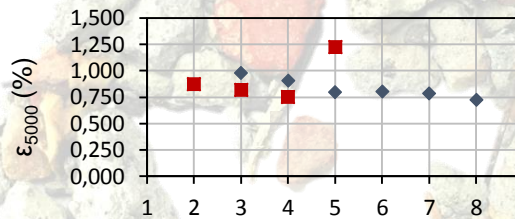
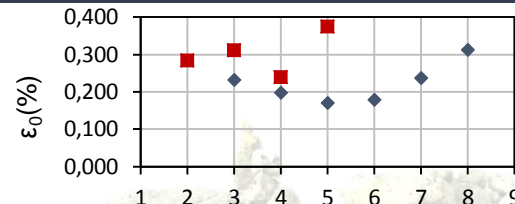
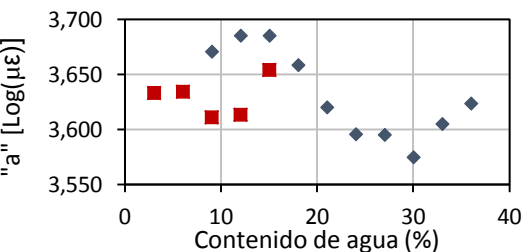
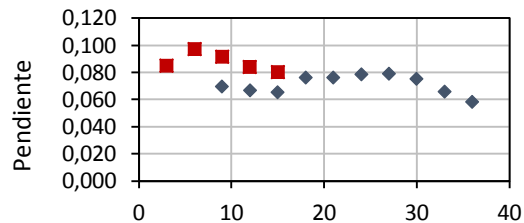
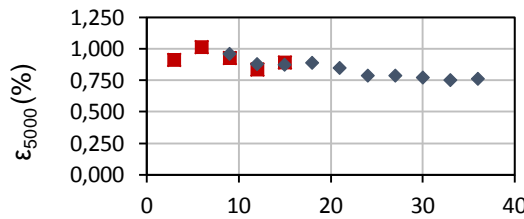
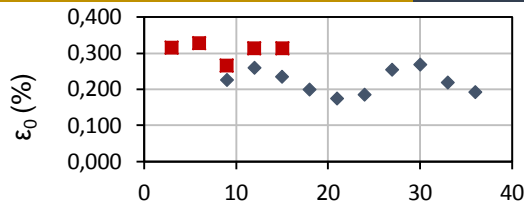


- Ensayo realizado en condiciones de curado completo (18 meses)



- Se eligió Norma BSi DD 226:1996 para poder ensayar probetas de  $\varnothing 100$  mm
  - Probetas lubricadas con grasa de silicona y polvo de grafito
  - Temperatura de ensayo de  $30^{\circ}\text{C}$
  - Precarga de acondicionamiento de  $10 \text{ kPa}$  durante  $600 \text{ s} \pm 6 \text{ s}$
  - Carga dinámica de  $100 \text{ kPa} \pm 2 \text{ kPa}$ , con un ciclo por segundo hasta 5.000 ciclos

# Resistencia a la deformación permanente



- Mejor resistencia inicial
- Deformación final similar
- Evolución de deform. más lenta (menor pendiente)
- Mayor punto "a" pero solo debido a igual  $\epsilon_{5000}$  y menor pendiente
- Por tanto, los RCD mejoran la resistencia a deformación permanente de las mezclas

- Aunque parámetros como el coeficiente de Los Angeles o la afinidad árido-ligante resultaron pobres, las propiedades mecánicas fueron satisfactorias
- Ha sido posible reemplazar el 100% del árido por RCD sin producir un detrimento en las propiedades de las mezclas
- Algunas propiedades incluso mejoraron con la incorporación de los RCD cuando el contenido de ligante era superior al 4%
  - Resistencia (compresión, tracción indirecta, etc.)
  - Rigidez y sensibilidad térmica
  - Resistencia a la deformación permanente
- Comparando valores óptimos, las mezclas con RCD mostraron tener un mayor potencial, a costa de incrementar el contenido de ligante hasta el 6%-7%
- Se han encontrado debilidades:
  - No se mejoran los tiempos de curado con respecto a mezclas convencionales
  - En etapas tempranas es cuando muestran los peores resultados
  - En general necesitan mayores contenidos de agua y betún
- Los métodos de diseño tradicionales no sirven para este tipo de mezcla

- Realizar una exhaustiva caracterización de los áridos reciclados
- Emplear granulometrías con bajas cantidades de finos
- Emplear emulsiones catiónicas de rotura lenta
- Tener presentes las conclusiones extraídas para conseguir un buen diseño
- Emplear grava-emulsiones con RCD en:
  - Carreteras de medio/bajo tráfico
  - Carreteras con explanadas de mala calidad
  - Capas de base
- Aplicar compactación energética para drenar la mayor cantidad posible de agua
- Dejar (en la medida de lo posible) desarrollar los procesos de maduración
- Aumentar el número de muestras en ensayos de laboratorio (heterogeneidad)
- Seguir el protocolo propuesto para conseguir muestras más homogéneas
- Desarrollar una normativa técnica que regule la utilización de los RCD como árido en mezclas bituminosas en frío con criterios mínimos de seguridad

# APLICACIÓN SOSTENIBLE DE RESIDUOS DE CONSTRUCCIÓN Y DEMOLICIÓN COMO ÁRIDO RECICLADO DE MEZCLAS BITUMINOSAS EN FRÍO

Gracias por su atención

