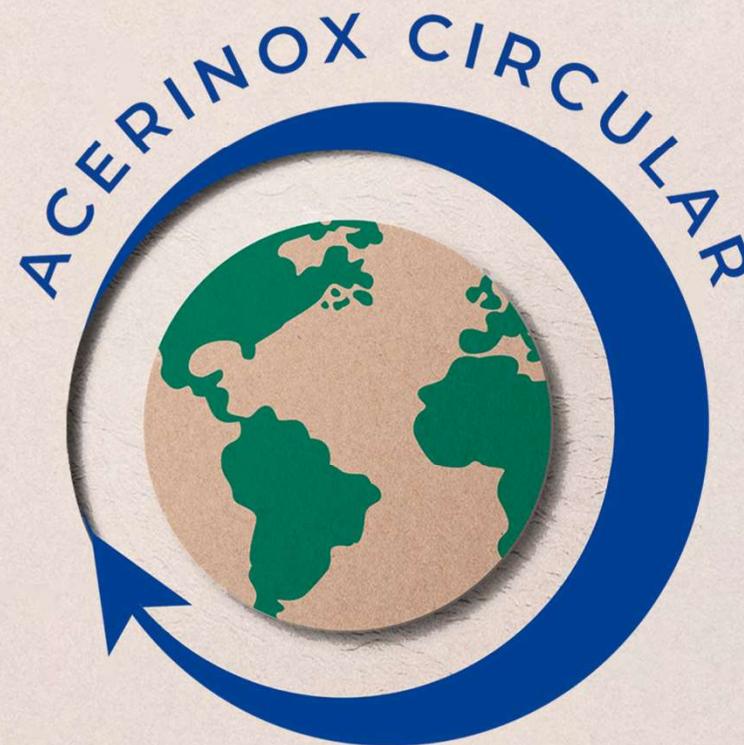


**X JORNADAS CÁTEDRA ACERINOX**  
**MARZO 2023**





---

# MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CONGLOMERANTES SOSTENIBLES

DR. JAVIER LUNA (EQA LABORATORIOS)  
DR. JOSÉ MIGUEL AZAÑÓN (UGR)



Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)  
*Una manera de hacer europa*



# ÍNDICE

**01**

La estabilización de suelos: ¿qué es y por qué se usa?

**02**

Tipos de suelos

**03**

Estabilización y necesidad de nuevos conglomerantes

**04**

Método sostenible para el ensayo de suelos: suelos equivalentes



Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)  
*Una manera de hacer europa*



## 01. LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS: ¿QUÉ ES Y POR QUÉ SE USA?

### ¿Qué es la estabilización?

Añadir conglomerante a un suelo para mejorar:

- su **estabilidad volumétrica**
- su **resistencia** y el **módulo esfuerzo-deformación**
- su **permeabilidad** y **durabilidad**
- reducir su **susceptibilidad al agua**

### ¿Por qué se estabilizan suelos?

Para **no** tener que llevar a **vertedero** el suelo, con consiguiente gasto de vertedero, de combustible, de extracción y/o transporte de otro suelo más adecuado, etc.



<https://360enconcreto.com/blog/detalle/caracteristicas-del-suelo-cemento-que-y-para-que/>

# 01. LA ESTABILIZACIÓN DE SUELOS: ¿QUÉ ES Y POR QUÉ SE USA?

Normativa



BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO



Núm. 3

Sábado 3 de enero de 2015

Sec. III. Pág. 674

## 512 SUELOS ESTABILIZADOS IN SITU

### 512.1 DEFINICIÓN

Se define como suelo estabilizado in situ la mezcla homogénea y uniforme de un suelo con un conglomerante, del tipo cal o cemento, y eventualmente agua, con el objetivo de disminuir su plasticidad y susceptibilidad al agua o aumentar su resistencia, y que convenientemente compactada, se utiliza en la formación de explanadas y rellenos tipo terraplén.

La ejecución de un suelo estabilizado in situ incluye las siguientes operaciones:

- Estudio de la mezcla y obtención de la fórmula de trabajo.
- Preparación de la superficie existente, cuando proceda.
- Disgregación del suelo.
- Humectación o desecación del suelo.
- Distribución del conglomerante.
- Ejecución de la mezcla.
- Compactación.
- Terminación de la superficie.
- Curado y protección superficial.



Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)  
Una manera de hacer europa





---

## 02. TIPOS DE SUELOS

-Suelos granulares

-Suelos limosos

-Suelos arcillosos:

- Suelos plásticos con carbonato cálcico

- Suelos plásticos con yeso

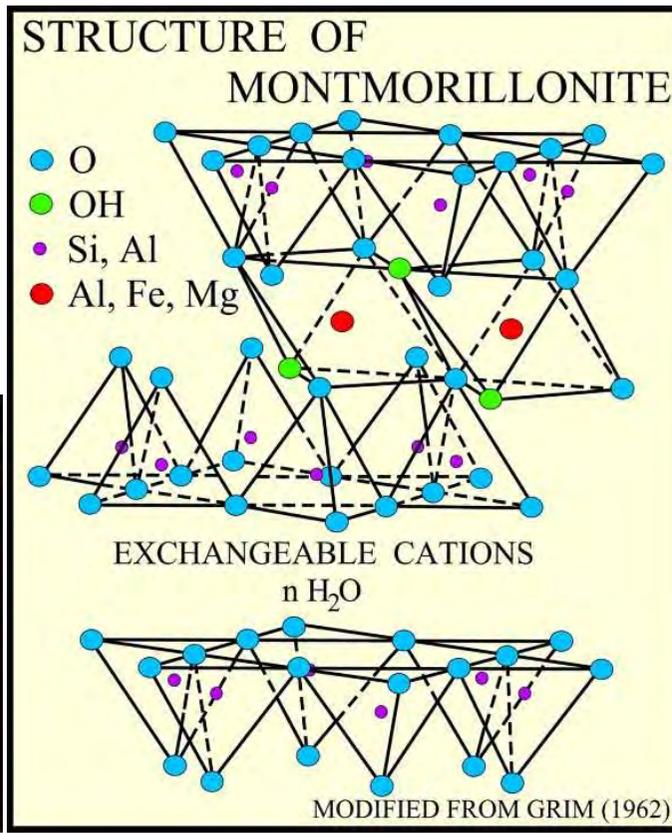
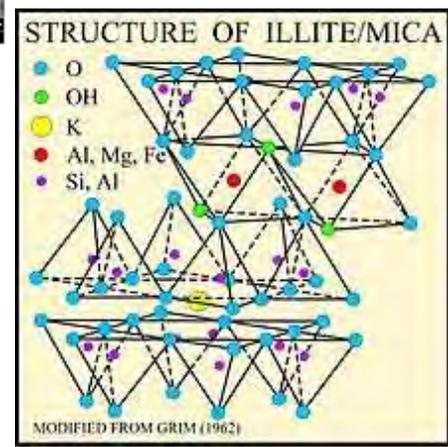
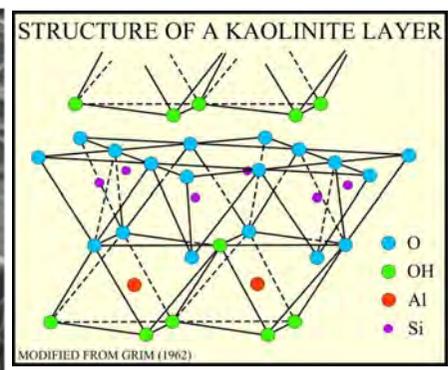
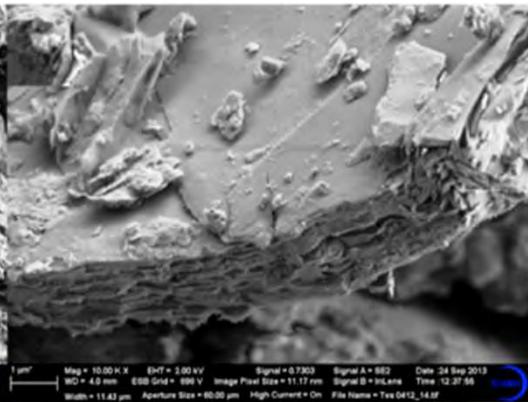
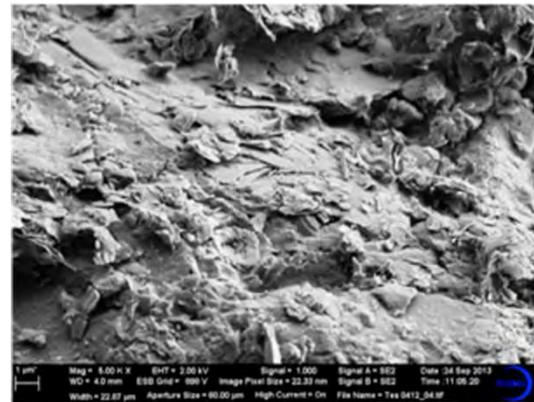
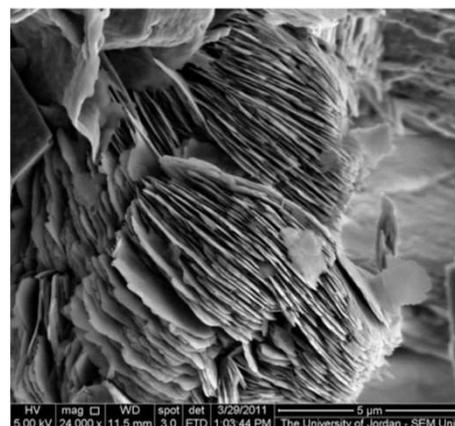
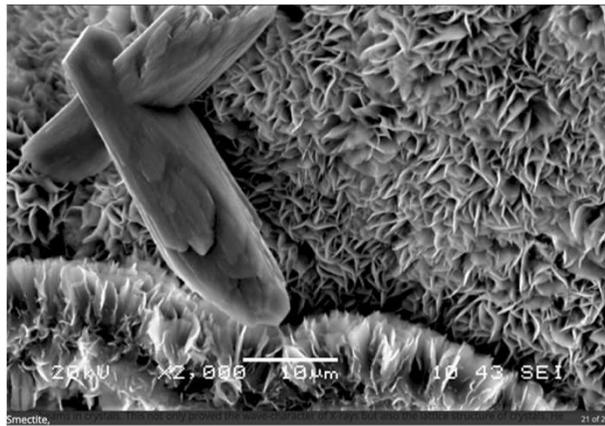


Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)  
*Una manera de hacer europa*



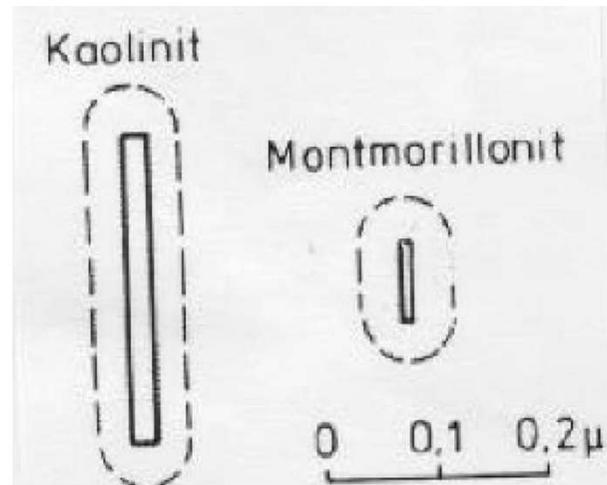
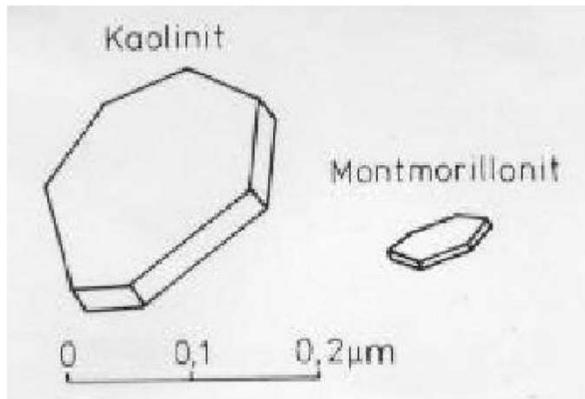
### 03. ESTABILIZACIÓN Y NECESIDAD DE NUEVOS CONGLOMERANTES

#### Minerales de la arcilla (1 de 2)



### 03. ESTABILIZACIÓN Y NECESIDAD DE NUEVOS CONGLOMERANTES

Minerales de la arcilla (2 de 2)

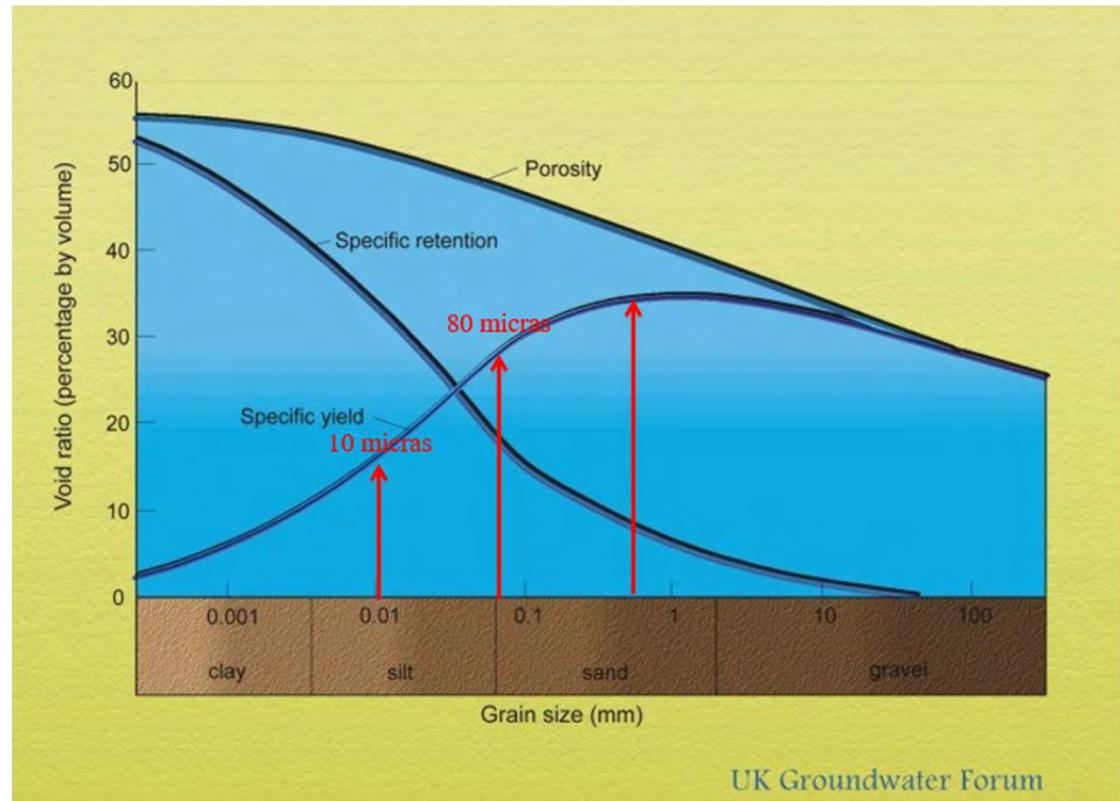
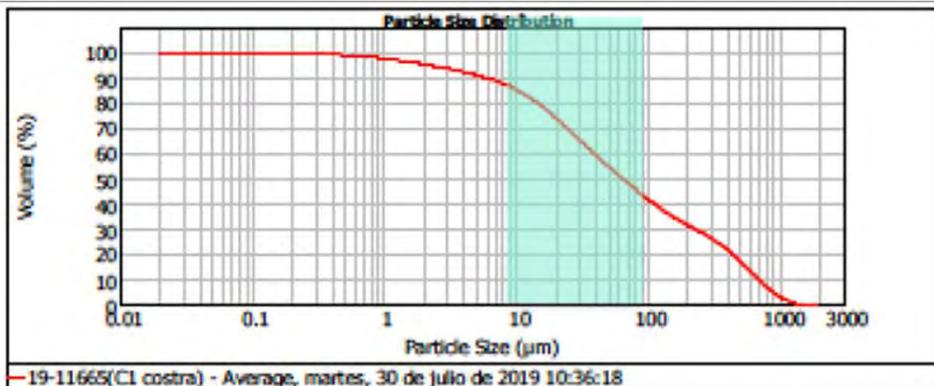


Superficie específica	
Tipo de suelo	Superficie específica (m <sup>2</sup> /g)
Minerales arcillosas	
Montmorillonita	Más de 840
Ilita	65-200
Caolinita	10-20
Arena limpia	aprox. 2x10 <sup>-4</sup>

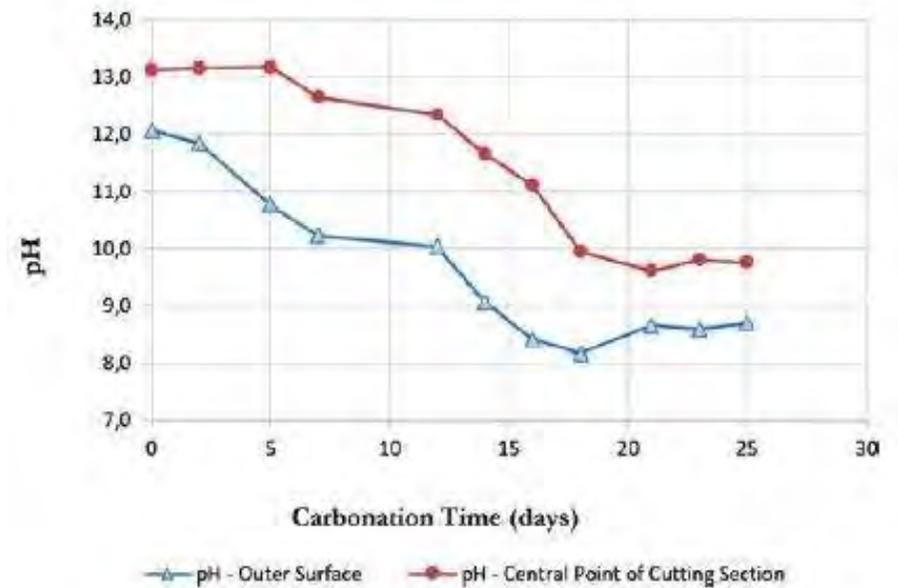
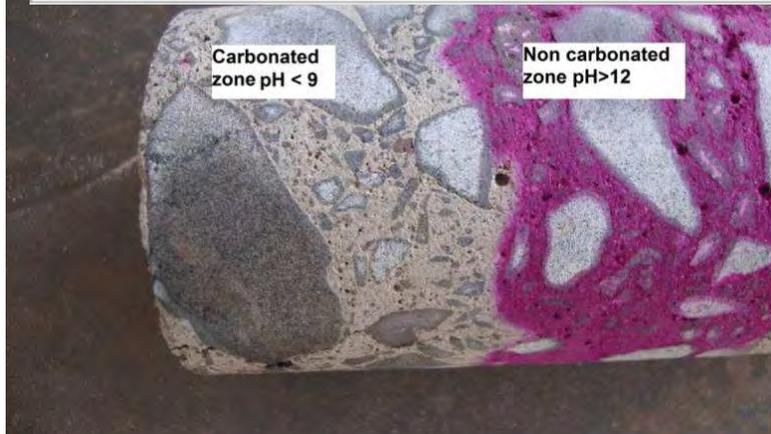
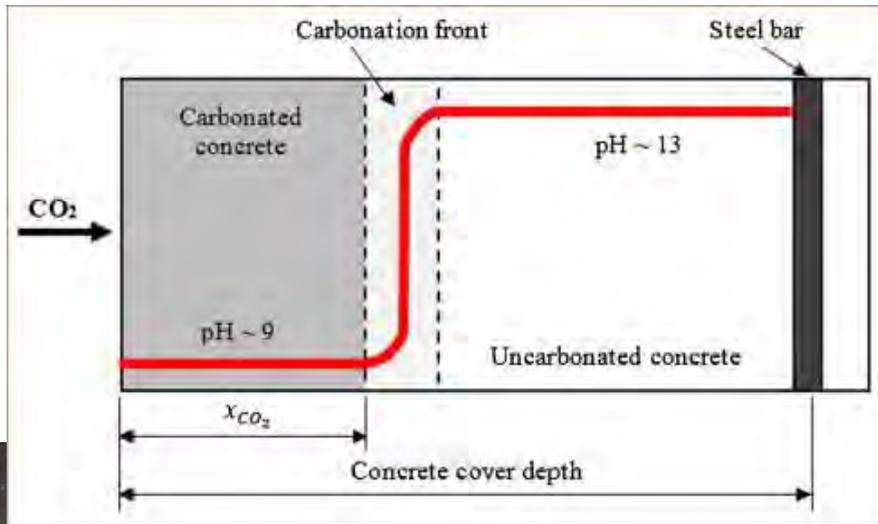
### 03. ESTABILIZACIÓN Y NECESIDAD DE NUEVOS CONGLOMERANTES

#### POROSIDAD EFICAZ Y CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Porosidad de suelos arenosos y suelos arcillosos

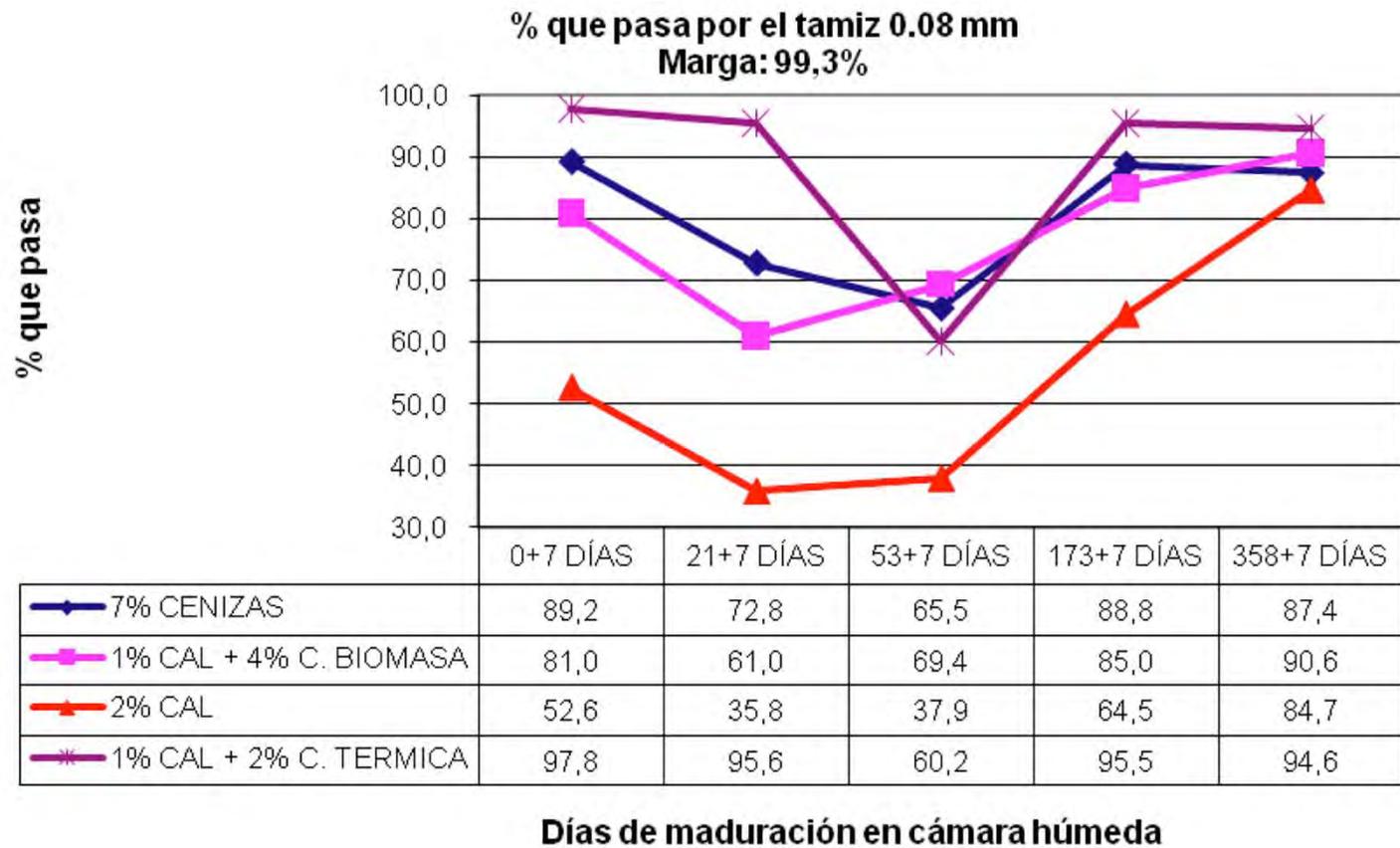


### 03. ESTABILIZACIÓN Y NECESIDAD DE NUEVOS CONGLOMERANTES



### 03. ESTABILIZACIÓN Y NECESIDAD DE NUEVOS CONGLOMERANTES

Evolución de la granulometría a largo plazo (MEJORA GRANULOMÉTRICA (AOPJA-SACYR. TRAMO PRUEBA AUTOVÍA DEL OLIVAR))



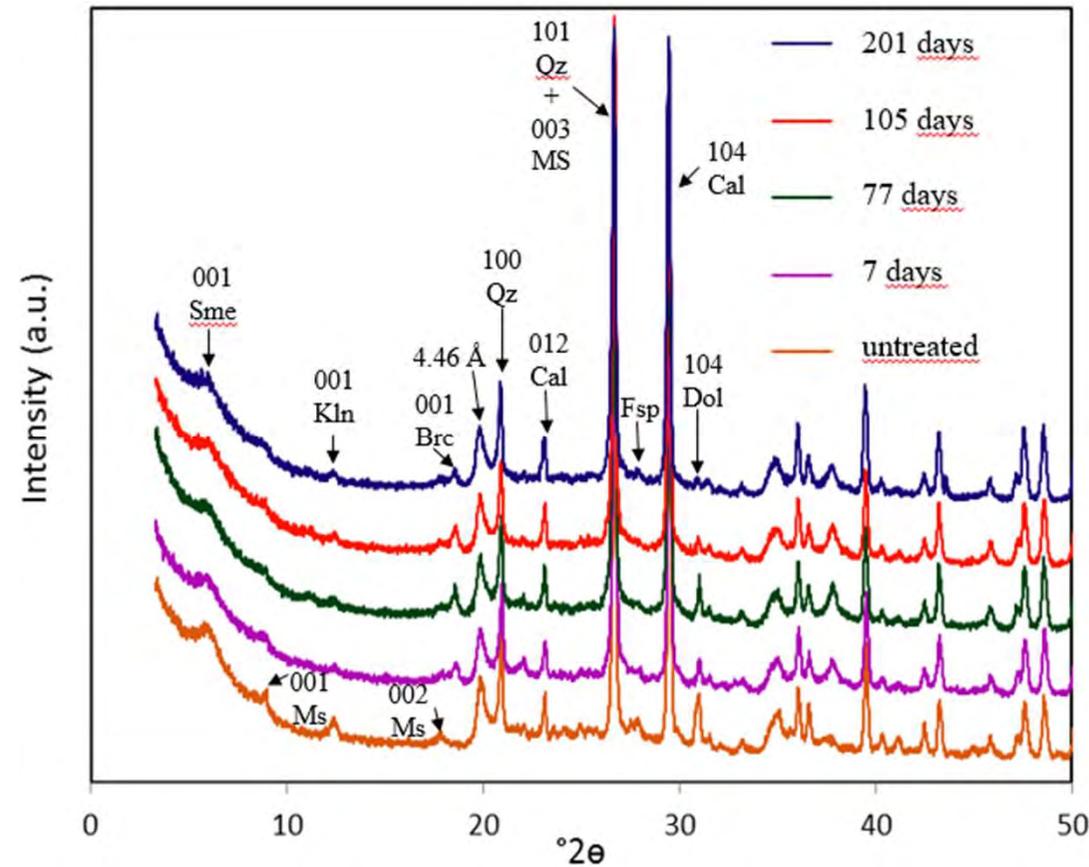
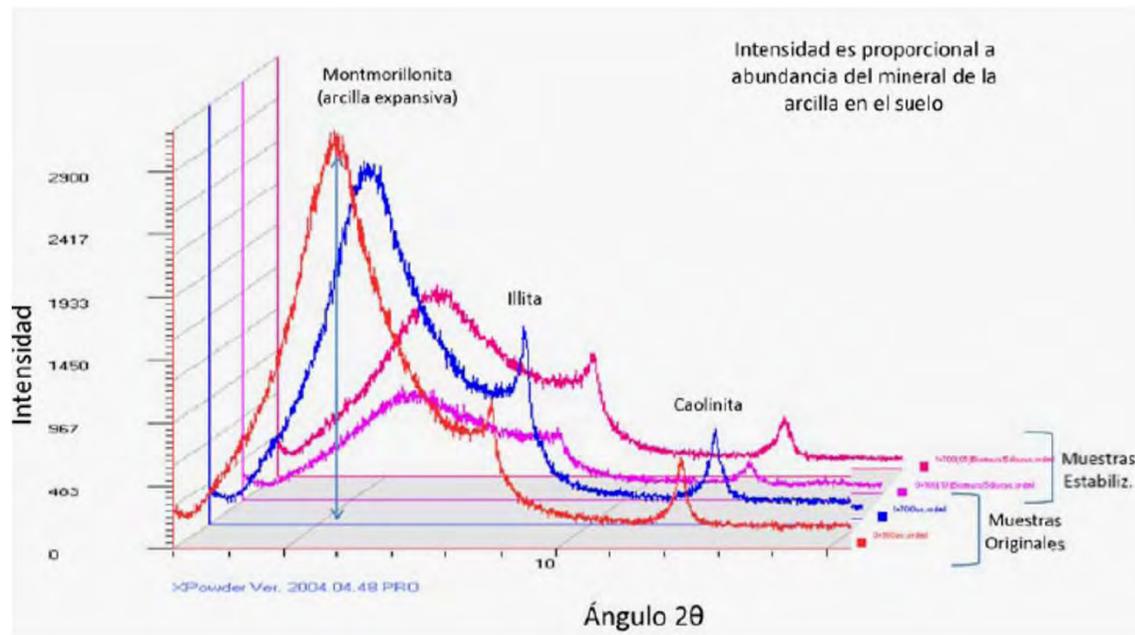
### 03. ESTABILIZACIÓN Y NECESIDAD DE NUEVOS CONGLOMERANTES

Cambio en las Propiedades Físicas de la muestra tras un año de tratamiento

Tipo de Mezcla	Curado (dias)	Finos (%)	Índice de Plasticidad (%)	CBR (%)	Hinchamiento libre (%)	pH
Marga + 2% Cal	7	52,6	10,5	86,5	2,2	13,8
	28	35,8	9,0	127,0	1,3	12,7
	60	37,9	13,3	144,8	0,4	12,5
	180	64,5	NP	110,6	0,6	11,3
	365	84,7	16,5	24,1	0,9	10,9

### 03. ESTABILIZACIÓN Y NECESIDAD DE NUEVOS CONGLOMERANTES

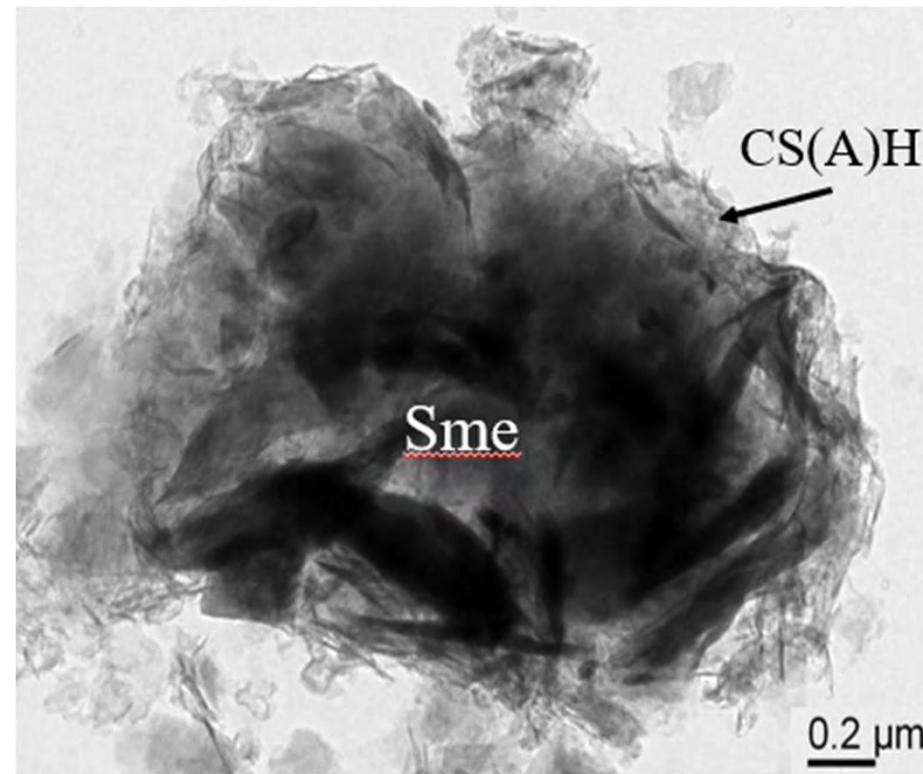
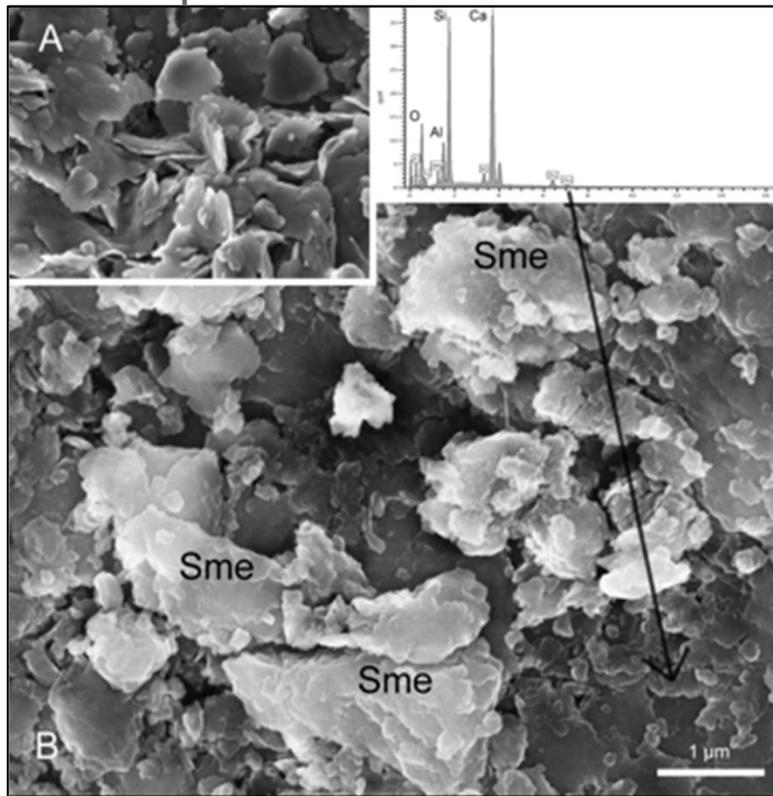
#### ANÁLISIS DE LAS MARGAS TRATADAS Difracción de rayos X



### 03. ESTABILIZACIÓN Y NECESIDAD DE NUEVOS CONGLOMERANTES

#### ANÁLISIS DE LAS MARGAS TRATADAS

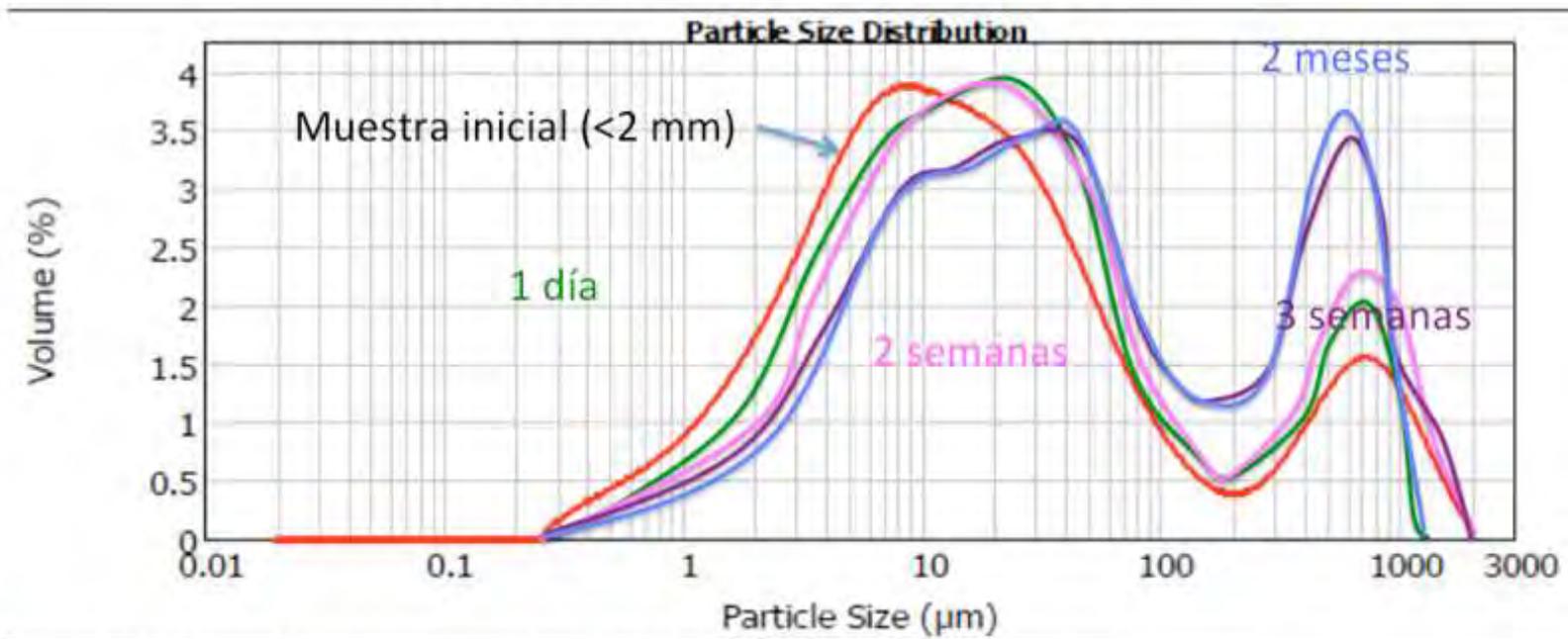
#### Microscopía Electrónica de Barrido y de Transmisión



### 03. ESTABILIZACIÓN Y NECESIDAD DE NUEVOS CONGLOMERANTES

TRATAMIENTO CON HRB (HYDRAULIC ROAD BINDER) AL 3%

EVOLUCIÓN DE CURVA GRANULOMÉTRICA DE LA MUESTRA TAMIZADA POR DEBAJO DE 2 mm



19-3590(2 mm)) - Average. miércoles. 13 de marzo de 2019 13:16:47



Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)  
Una manera de hacer europa



## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

Trabajar con suelos equivalentes en lugar de con suelos originales

*-cortar suelos originales por tamiz 2 mm y quedarse con lo que pasa: suelo equivalente*



## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

Trabajar con suelos equivalentes en lugar de con suelos originales

-Calcular la cantidad de suelo equivalente (y de conglomerante, en su caso) a partir de la superficie específica del suelo original y del suelo equivalente

GRANULOMETRÍA DEL ÁRIDO				
TAMIZ (mm)	ACUMULADO QUE PASA (%)	DIAMETRO MEDIO (mm)	% QUE PASA POR FRACCIÓN (%)	SUPERFICIE ESPECIFICA POR FRACCIÓN (mm <sup>2</sup> )
0,063	36,15789216	0,0315	36,15789216	2,52E+07
0,125	43,90903352	0,09	7,751141355	1,81E+06
0,25	54,88531534	0,19	10,97628182	1,28E+06
0,5	64,43540265	0,38	9,550087309	5,59E+05
1	76,85593208	0,75	12,42052943	3,63E+05
2	100	1,50	23,14406792	3,39E+05
4	100	3,00	0	0,00E+00
11,2	100	10,60	0	0,00E+00
12,5	100	11,85	0	0,00E+00
14	100	13,25	0	0,00E+00
16	100	15,00	0	0,00E+00
20	100	18,00	0	0,00E+00
22,4	100	21,20	0	0,00E+00
31,5	100	26,95	0	0,00E+00
2000	100	1015,75	0	0,00E+00
4000	100	3000,00	0	0,00E+00
<b>Total :</b>				2,955E+07
<b>SUPERFICIE ESPECIFICA HUMEDA (m<sup>2</sup>/kg) :</b>				<b>29,327</b>

## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

Trabajar con suelos equivalentes en lugar de con suelos originales

Con las ventajas de que:

**-se reduce la cantidad de toma de muestra en torno al 70%**

**Lo que implica también:**

**-menor gasto de material de la zona**

**-menor gasto de combustible**

**-mejor acarreo...**



## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

Trabajar con suelos equivalentes en lugar de con suelos originales

Con las ventajas de que:

***-se reduce el tiempo de ensayo***

*Por ejemplo:*

***Trabajabilidad de 3 h a 40 min***

***Compresión de 7 a 3 días***



## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

Trabajar con suelos equivalentes en lugar de con suelos originales

Con las ventajas de que:

*-se pueden usar moldes reducidos (mejor acarreo y manipulación de muestras...)*



## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

Ejemplo de diseño de un suelo equivalente (a partir de un suelo original construido)

MUESTRA 1: ZAHORRA ORIGINAL M1		MUESTRA 2: ZAHORRA ORIGINAL+FILLER (APROX. 15% FINOS) M2		MUESTRA 3: ZAHORRA ORIGINAL+FILLER+BENTONITA (APROX. 15% FINOS- FILLER Y BENTONITA AL 50%) M3		MUESTRA 4: ZAHORRA ORIGINAL+BENTONITA (APROX. 15% FINOS) M4		MUESTRA 5: ZAHORRA ORIGINAL+BENTONITA+YESO (APROX. 15% FINOS-BENTONITA AL 66% Y YESO AL 33%)	
% BENTONITA	0	% BENTONITA	0	% BENTONITA	5,5	% BENTONITA	10	% BENTONITA	6,6
% FILLER	0	% FILLER	11	% FILLER	5,5	% FILLER	0	% FILLER	0
% YESO	0	% YESO	0	% YESO	0	% YESO	0	% YESO	3,3
% ARENA 0/4	38	% ARENA 0/4	33,82	% ARENA 0/4	33,82	% ARENA 0/4	34,2	% ARENA 0/4	33,8
% GRAVA 15	35	% GRAVA 15	31,15	% GRAVA 15	31,15	% GRAVA 15	31,5	% GRAVA 15	31,5
% GRAVA 25	27	% GRAVA 25	24,03	% GRAVA 25	24,03	% GRAVA 25	24,3	% GRAVA 25	24,3

## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

Ejemplo de diseño de un suelo equivalente (a partir de un suelo original construido)

M1C3%		M2C3%		M3C3%		M4C3%		M5C3%	
%, BENTONITA	0	%, BENTONITA	0	%, BENTONITA	5,5	%, BENTONITA	10	%, BENTONITA	6,6
%, FILLER	0	%, FILLER	11	%, FILLER	5,5	%, FILLER	0	%, FILLER	0,0
%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	3,3
%, ARENA 0/4	38	%, ARENA 0/4	33,82	%, ARENA 0/4	33,82	%, ARENA 0/4	34,2	%, ARENA 0/4	33,8
%, GRAVA 15	35	%, GRAVA 15	31,15	%, GRAVA 15	31,15	%, GRAVA 15	31,5	%, GRAVA 15	31,5
%, GRAVA 25	27	%, GRAVA 25	24,03	%, GRAVA 25	24,03	%, GRAVA 25	24,3	%, GRAVA 25	24,4
%, CEMENTO	3	%, CEMENTO	3	%, CEMENTO	3	%, CEMENTO	3	%, CEMENTO	3,0

M1HRB3%		M2HRB3%		M3HRB3%		M4HRB3%		M5HRB3%	
%, BENTONITA	0	%, BENTONITA	0	%, BENTONITA	5,5	%, BENTONITA	10	%, BENTONITA	6,6
%, FILLER	0	%, FILLER	11	%, FILLER	5,5	%, FILLER	0	%, FILLER	0,0
%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	3,3
%, ARENA 0/4	38	%, ARENA 0/4	33,82	%, ARENA 0/4	33,82	%, ARENA 0/4	34,2	%, ARENA 0/4	33,8
%, GRAVA 15	35	%, GRAVA 15	31,15	%, GRAVA 15	31,15	%, GRAVA 15	31,5	%, GRAVA 15	31,5
%, GRAVA 25	27	%, GRAVA 25	24,03	%, GRAVA 25	24,03	%, GRAVA 25	24,3	%, GRAVA 25	24,4
%, HRB	3	%, HRB	3	%, HRB	3	%, HRB	3	%, HRB	3,0

## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

Ejemplo de diseño de un suelo equivalente (a partir de un suelo original construido)

Denominación de la fórmula		3% cemento										
MODIFICACIÓN:		Formula inicial										
		Buto	Características de los constituyentes				Húmedo		MSE húmedo*	MSE seco		
	Designación	Proporciones (kg)	MV (kg/m3)	Absor.	Contenido de agua	Superficie específica húmeda (m <sup>2</sup> /kg)	Proporciones (kg)	Volumen (litros)	Proporciones	Proporciones	Volumen (litros)	
Cemento	CEM II/B-L 32,5 R FYM	40	3000				39,8	13,3	40	40	13,3	
Adición												
Agua	Agua desmineralizada		MV imb.									
SUELO EQUIVALENTE	SUELO EQUIVALENTE	0	2754	0,76%		29,327	0,0	0,0	511,8	507,9	185,8	
Sable 2												
Sable 3												
Sable 4												
Sable 5												
FILLER	FILLER		3152	2,97%		56,131						
BENTONITA	BENTONITA	100	1906	3,00%		99,306	103,0	54,1				
ARENA 0-4	ARENA 0/4	342	2860	0,79%		11,807	342,0	119,6				
MEZCLA GRUESOS	GRAVA 15 + GRAVA 25	552	2870	0,34%		1,345	551,8	192,3				
Aditivo 1					Extracto seco:							
Aditivo 2												
Aditivo 3												
Aire												
							Volumen teórico de la fórmula:	379,2				
Densidad Real:							Masa total:	1036,6	Volumen total : 199,0			

## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

Ejemplo de diseño de un suelo equivalente (a partir de un suelo original construido)

MUESTRA 1: ZAHORRA ORIGINAL M1		MUESTRA 2: ZAHORRA ORIGINAL+FILLER (APROX. 15% FINOS) M2		MUESTRA 3: ZAHORRA ORIGINAL+FILLER+BENTONITA (APROX. 15% FINOS- FILLER Y BENTONITA AL 50%) M3		MUESTRA 4: ZAHORRA ORIGINAL+BENTONITA (APROX. 15% FINOS) M4		MUESTRA 5: ZAHORRA ORIGINAL+BENTONITA+YESO (APROX. 15% FINOS-BENTONITA AL 66% Y YESO AL 33%)	
%, BENTONITA	0	%, BENTONITA	0	%, BENTONITA	5,5	%, BENTONITA	10	%, BENTONITA	6,6
%, FILLER	0	%, FILLER	11	%, FILLER	5,5	%, FILLER	0	%, FILLER	0
%, YESO	0	%, YESO	0	%, YESO	0	%, YESO	0	%, YESO	3,3
%, ARENA 0/4	38	%, ARENA 0/4	33,82	%, ARENA 0/4	33,82	%, ARENA 0/4	34,2	%, ARENA 0/4	33,8
%, GRAVA 15	35	%, GRAVA 15	31,15	%, GRAVA 15	31,15	%, GRAVA 15	31,5	%, GRAVA 15	31,5
%, GRAVA 25	27	%, GRAVA 25	24,03	%, GRAVA 25	24,03	%, GRAVA 25	24,3	%, GRAVA 25	24,3



MUESTRA 1.1: ZAHORRA ORIGINAL (MSE) M1.1		MUESTRA 2.1: ZAHORRA ORIGINAL+FILLER (APROX. 15% FINOS) – MSE M2.1		MUESTRA 3.1: ZAHORRA ORIGINAL+FILLER+BENTONITA (APROX. 15% FINOS- FILLER Y BENTONITA AL 50%) – MSE M3.1		MUESTRA 4.1: ZAHORRA ORIGINAL+BENTONITA (APROX. 15% FINOS) – MSE M4.1		MUESTRA 5.1: ZAHORRA ORIGINAL+BENTONITA+YESO (APROX. 15% FINOS-BENTONITA AL 66% Y YESO AL 33%) M5.1	
%, BENTONITA	0,00	%, BENTONITA	0,00	%, BENTONITA	12,27	%, BENTONITA	22,62	%, BENTONITA	14,90
%, FILLER	0,00	%, FILLER	24,54	%, FILLER	12,27	%, FILLER	0,00	%, FILLER	0,00
%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	7,60
%, ARENA 0/2	100	%, ARENA 0/2	75,46	%, ARENA 0/2	75,46	%, ARENA 0/2	77,38	%, ARENA 0/2	77,30

## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

Ejemplo de diseño de un suelo equivalente (a partir de un suelo original construido)

M1HRB3%		M2HRB3%		M3HRB3%		M4HRB3%		M5HRB3%	
%, BENTONITA	0	%, BENTONITA	0	%, BENTONITA	5,5	%, BENTONITA	10	%, BENTONITA	6,6
%, FILLER	0	%, FILLER	11	%, FILLER	5,5	%, FILLER	0	%, FILLER	0,0
%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	0,00	%, YESO	3,3
%, ARENA 0/4	38	%, ARENA 0/4	33,82	%, ARENA 0/4	33,82	%, ARENA 0/4	34,2	%, ARENA 0/4	33,8
%, GRAVA 15	35	%, GRAVA 15	31,15	%, GRAVA 15	31,15	%, GRAVA 15	31,5	%, GRAVA 15	31,5
%, GRAVA 25	27	%, GRAVA 25	24,03	%, GRAVA 25	24,03	%, GRAVA 25	24,3	%, GRAVA 25	24,4
%, HRB	3	%, HRB	3	%, HRB	3	%, HRB	3	%, HRB	3,0

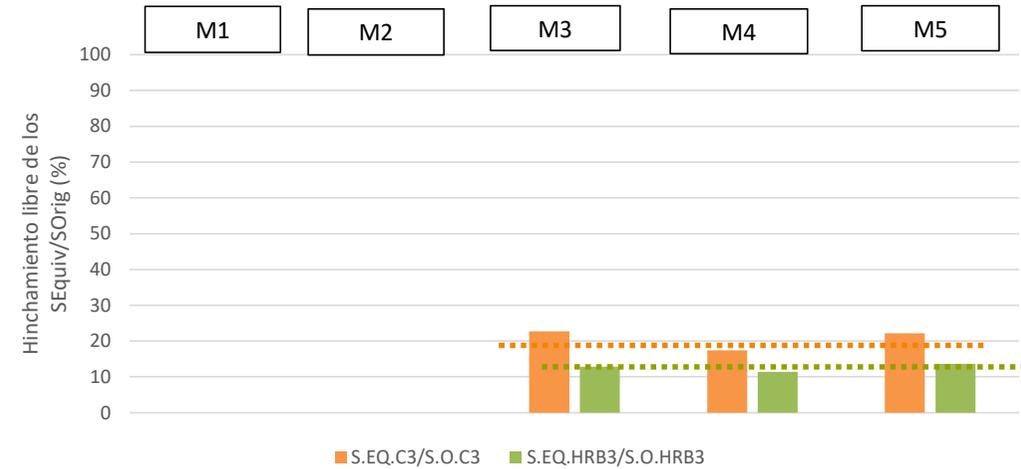
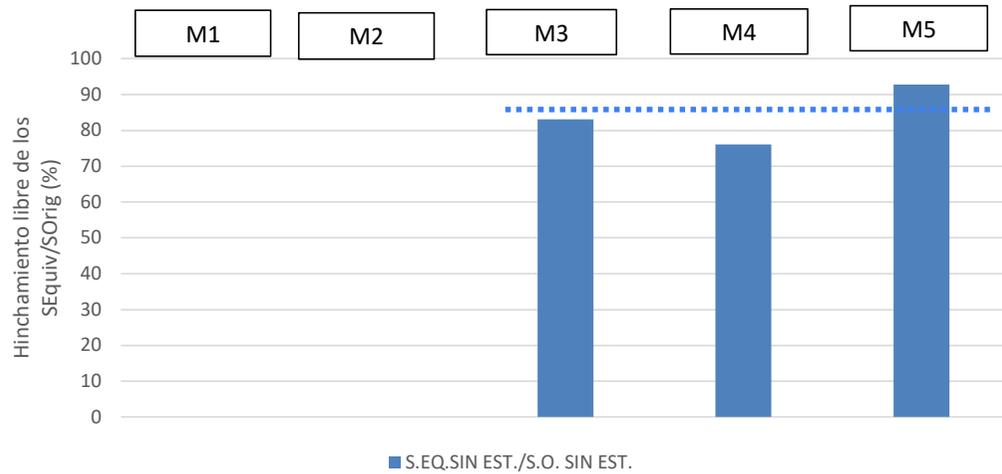


M1.1HRB3%		M2.1HRB3%		M3.1HRB3%		M4.1HRB3%		M5.1HRB3%	
%, BENTONITA	0,00	%, BENTONITA	0,00	%, BENTONITA	11,53	%, BENTONITA	21,37	%, BENTONITA	14,9
%, FILLER	0,00	%, FILLER	22,82	%, FILLER	11,53	%, FILLER	0,00	%, FILLER	0,0
%, YESO	0,00	%, YESO	7,6						
%, ARENA EQUIVALENTE 0/2	91,16	%, ARENA EQUIVALENTE 0/2	70,15	%, ARENA EQUIVALENTE 0/2	70,87	%, ARENA EQUIVALENTE 0/2	73,09	%, ARENA EQUIVALENTE 0/2	77,3
%, HRB	8,84	%, HRB	7,04	%, HRB	6,07	%, HRB	5,54	%, HRB	8,8

## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

Correlaciones entre suelos originales y suelos equivalentes (sin estabilizar y estabilizados)

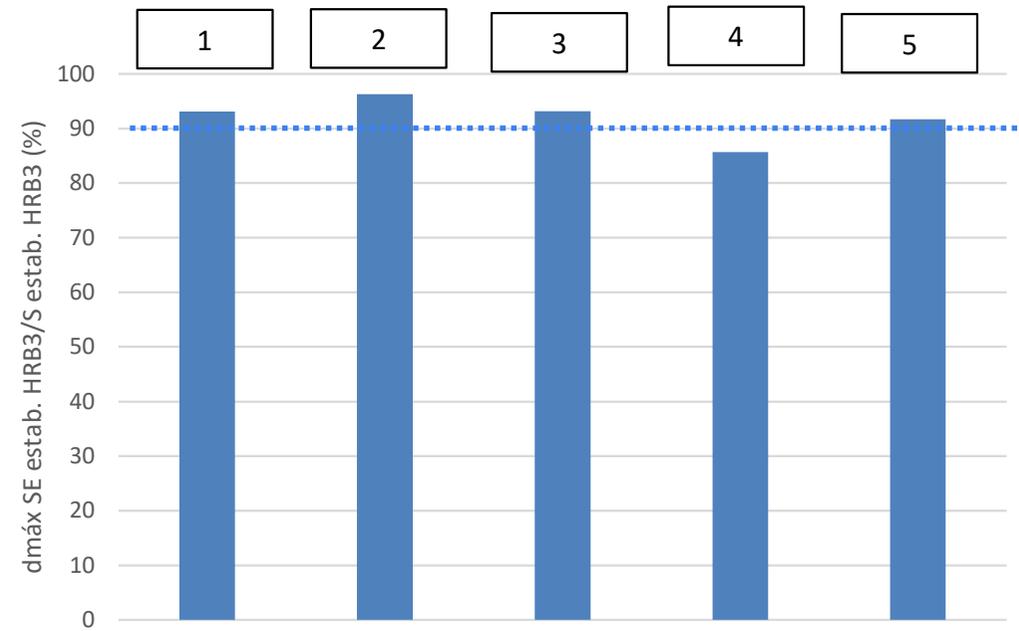
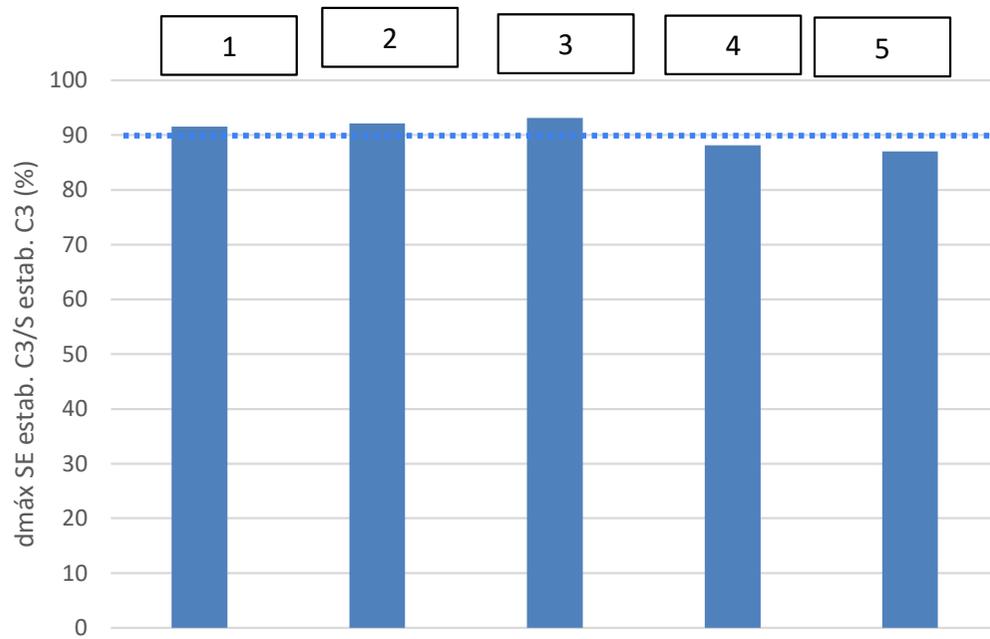
### Hinchamiento libre



## 04. MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS: SUELOS EQUIVALENTES

*Correlaciones entre suelos originales y suelos equivalentes (sin estabilizar y estabilizados)*

*Densidad máxima*



# CONCLUSIONES

- Es necesario diseñar nuevos conglomerantes como por ejemplo los HRB porque existen suelos que no se estabilizan adecuadamente con los conglomerantes no convencionales
- Los nuevos conglomerantes (HRB) deben de incluir residuos como escorias mezcla o polvo de ciclones y de filtros de hornos con objeto de valorizar residuos y bajar la huella de CO2 para contribuir a la sostenibilidad y a la economía circular
- Existe correlación entre los suelos originales y los suelos equivalentes y por tanto el método de los suelos equivalentes puede usarse para ensayar suelos y suelos estabilizados



# AGRADECIMIENTOS

Proyecto CERES, Ministerio de Ciencia e Innovación, CDTi, Evocas, FYM SUR, Acerinox, Magna, Alfran



Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER)  
*Una manera de hacer europa*



**X JORNADAS CÁTEDRA ACERINOX**  
**MARZO 2023**



# MÉTODO SOSTENIBLE PARA EL ENSAYO DE SUELOS Y ESTABILIZACIÓN DE SUELOS CON CONGLOMERANTES SOSTENIBLES

DR. JAVIER LUNA (EQA LABORATORIOS)

DR. JOSÉ MIGUEL AZAÑÓN (UGR)

---

## CONTACTO:



+34 609 11 85 38



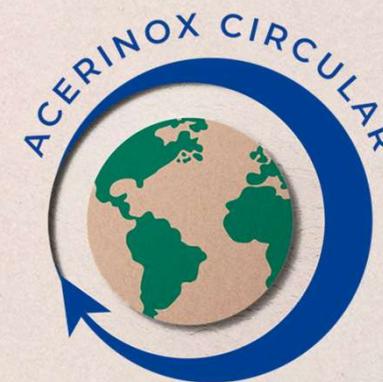
javierluna@eqalaboratorios.com



+34 655 978 762



jazanon@ugr.es



X JORNADAS CÁTEDRA ACERINOX

