



**SUELO-CEMENTO EN PAVIMENTOS  
ENTRE  
EL MITO Y LA REALIDAD**



Ing. MSc. RUBEN DEL PUERTO GARABANO  
OCTUBRE 2014  
ASUNCION-PARAGUAY



## ANTECEDENTES

En los primeros años de la década de 1930, como parte de un proyecto de investigación conjunta realizado entre el Departamento de carreteras del Estado de South Carolina y la Portland Cement Association (PCA), fue construida una sección de base de suelo cemento de 2,4 km, cerca de Johnsonville.

Esta obra es considerada la primera en la cual fue utilizado el suelo cemento, como un material de ingeniería, y que aun permanece en servicio actualmente.



**En 1935, la PCA comenzó un extenso programa para desarrollar métodos científicos de control para producir mezclas de cemento portland y varios tipos de suelos que sean uniformes y durables**

# DISEÑO DE MEZCLAS DE SUELO-CEMENTO

EN UN PRINCIPIO

**¡¡ LA DURABILIDAD !!**

(PCA – 1935)



ENSAYO DE HUMEDECIMIENTO Y SECADO (ASTM D 559 / AASHTO T-135)

ENSAYO DE CONGELAMIENTO Y DESCONGELAMIENTO (ASTM D 560 / AASHTO T-136)



# MAXIMA PERDIDA ADMISIBLE EN ENSAYOS DE DURABILIDAD (PCA)

<u>AASHTO soil group</u>	<u>Unified soil group</u>	<u>Maximum allowable weight loss, percent</u>
A-1-a	GW, GP, GM, SW, SP, SM	14
A-1-b	GM, GP, SM, SP	14
A-2	GM, GC, SM, SC	14*
A-3	SP	14
A-4	CL, ML	10
A-5	ML, MH, CH	10
A-6	CL, CH	7
A-7	OH, MH, CH	7

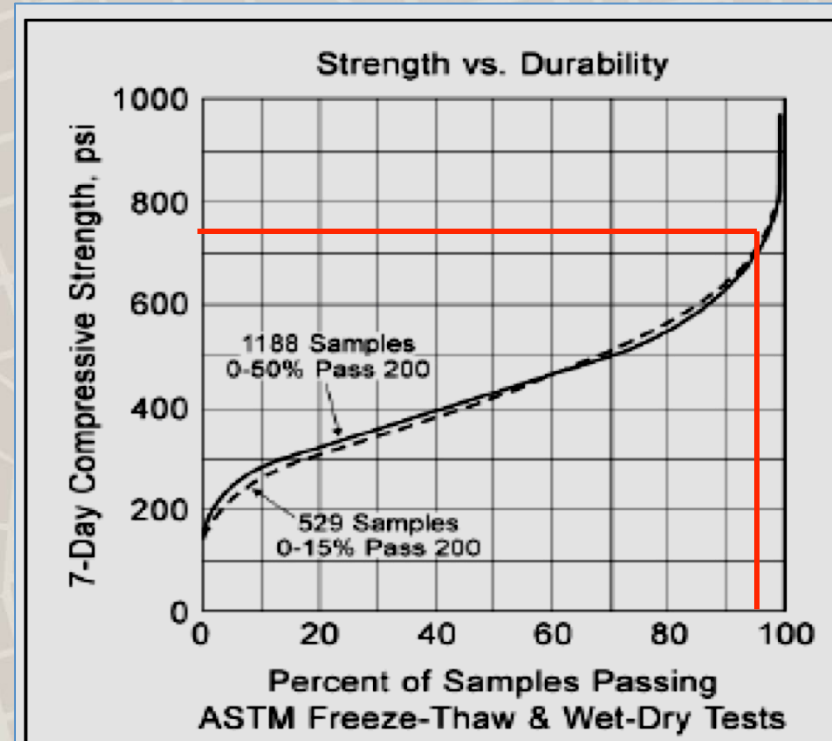


## ¡¡ EL TIEMPO ES ORO !!

TIEMPO DE EJECUCION DE  
ENSAYOS DE DURABILIDAD > 3  
SEMANAS

RESISTENCIA A COMPRESION  
NO CONFINADA (ASTM D  
1633) A LOS 7 DIAS

750 PSI (53 KG/CM<sup>2</sup>) CUMPLE  
EN EL 95 % DE LOS ENSAYOS



Relación entre  $R_{c7}$  y  
Durabilidad de Suelos  
Tratados con Cemento (ACI  
230.1R-90, 1990)

# CAPAS CEMENTADAS EN PAVIMENTOS - SUDAFRICA

LO QUE SE PUEDE

**!!! SE DEBE MEJORAR !!!**

**BASE ESTABILIZADA < 8 % DE DESGASTE**

**SUB BASE ESTABILIZADA < 12 % DE DESGASTE**





# FACTORES QUE INFLUYEN PARA LA DURABILIDAD DEL MATERIAL

## ❑ LA CEMENTACION

SU INDICADOR PRINCIPAL ES LA RESISTENCIA A COMPRESION NO CONFINADA

NO DEPENDE SOLAMENTE DE LA CANTIDAD DE CEMENTO UTILIZADA

## ❑ LA COMPACTACION

ES UNO DE LOS FACTORES PRINCIPALES RESPONSABLES DE LA RESISTENCIA Y DURABILIDAD DEL MATERIAL

TIENE DIRECTA RELACION CON EL POTENCIAL DE FISURACION DEL MATERIAL





# LA CEMENTACION

**LA CALIDAD DE LA CEMENTACION Y SU ESTABILIDAD ES LA PRINCIPAL RESPONSABLE DE LA DURABILIDAD DEL MATERIAL**

**LA CALIDAD DE LA CEMENTACION DEPENDE DE:**

- EL GRADO DE HIDRATACION DEL CEMENTO (MENOR TAMAÑO DE PARTICULAS MAYOR GRADO DE HIDRATACION)**
- TEMPERATURA DURANTE EL PROCESO DE FRAGUADO (MAYOR TEMPERATURA PRODUCE MENOR CALIDAD DE CEMENTACION)**

**LA ESTABILIDAD DE LA CEMENTACION DEPENDE DE SU:**

- EXPOSICION A FLUJOS DE AGUA CAPILAR**
- EXPOSICION AL DIOXIDO DE CARBONO**

# LA COMPACTACION

**NO SIEMPRE**

**¡¡ TODO TIEMPO PASADO FUE MEJOR !!**

**1933 PROCTOR ESTÁNDAR (AASHTO T-99)**



**UTILIZADA EN LA NORMATIVA DEL PCA**

**1958 PROCTOR MODIFICADO (AASHTO T-180)**

**UTILIZADA EN LA NORMATIVA ACTUAL DE VARIOS PAISES**



## ENERGIAS DE COMPACTACION DE LOS DIFERENTES ENSAYOS

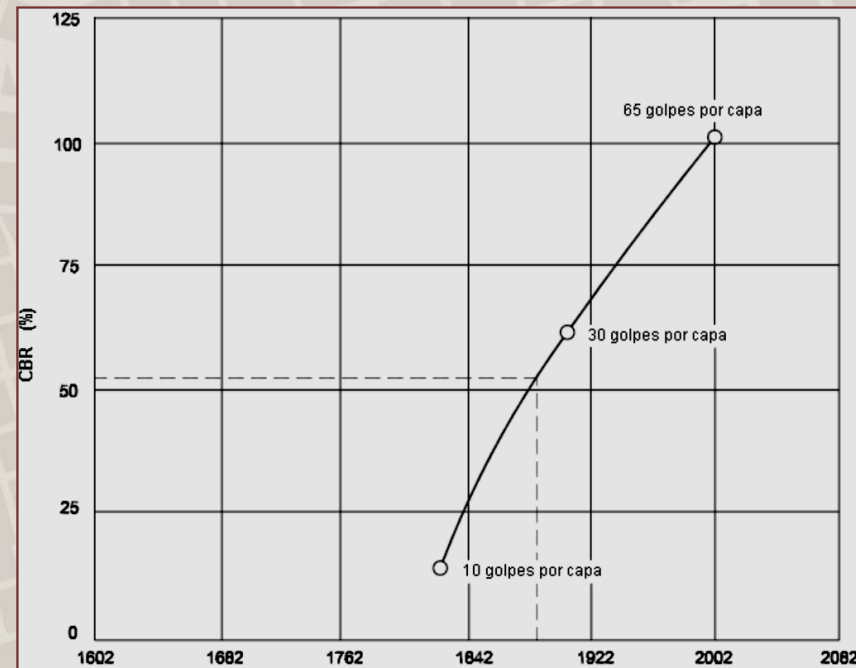
Ensayo		Molde			Compactación				Energía específica
s/ Vialidad Nacional	S/ AASHTO	Diámetro (cm)	Altura (cm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Capas	Golpes	Pisón (kg)	Altura de caída (cm)	(kcm/cm <sup>3</sup> )
I	T-99	10,16	11,16	904,3	3	25	2,5	30,5	6,33
II	T-180	10,16	11,16	904,3	5	25	4,5	45,0	28
III	-*	10,16	11,16	604,3	3	35	2,5	30,5	8,85
IV	T-99	15,24	11,16	2.034,7	3	56	2,5	30,5	6,27
V	T-180	15,24	11,16	2.034,7	5	56	4,5	45,0	27,87

\*T-99 Modificado por Vialidad Argentina

**LA ENERGIA DEL ENSAYO AASHTO T-99 REPRESENTA APROXIMADAMENTE EL 32 % DE LA ENERGIA DEL ENSAYO AASHTO T-180.**

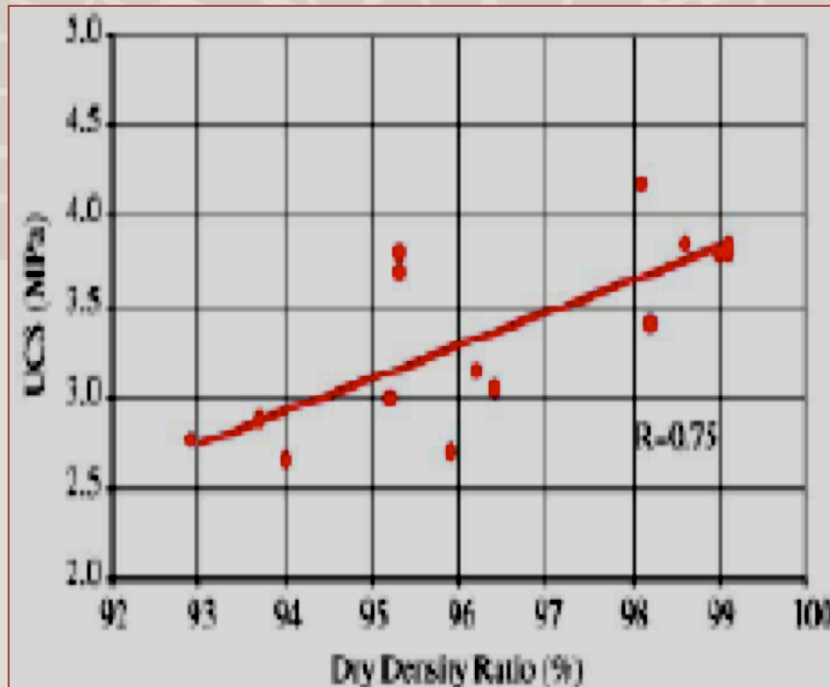
**ESTA ENERGIA ES EQUIVALENTE A LA APLICACIÓN DE 17 GOLPES POR CAPA EN EL ENSAYO AASHTO T-180**

**DENSIDAD SECA Vs CBR  
RELACIÓN DE SOPORTE DEL  
SUELO EN EL LABORATORIO  
(CBR DE LABORATORIO)  
I.N.V. E – 148 – 07**





# IMPACTO DE LA COMPACTACION EN LA RESISTENCIA DEL MATERIAL

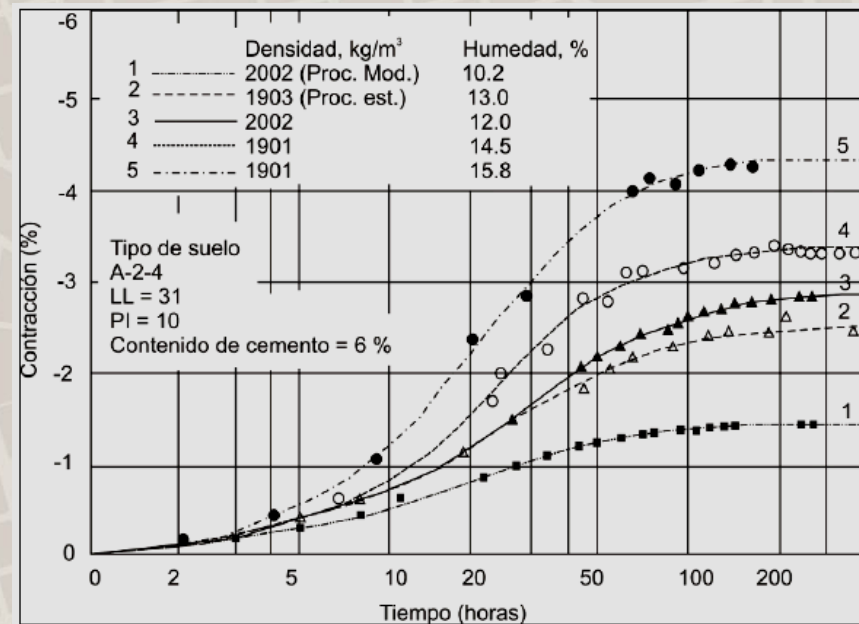


**Cada 1 % de incremento en compactación relativa conduce a aproximadamente 200 kPa (2 kg/cm<sup>2</sup>) de incremento en la Resistencia a compresión no confinada**

**(White y Gnanendran 2005)**

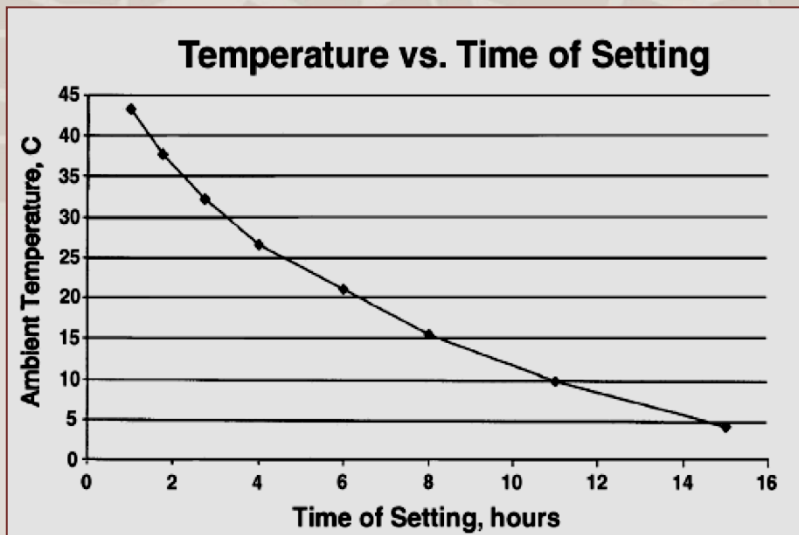
# IMPACTO DE LA COMPACTACION EN LA CONTRACCION DEL MATERIAL

La compactación de suelos estabilizados con cemento a un esfuerzo de Proctor modificado reduce la retracción más del 50 % comparado al suelo estabilizado compactado a una densidad de Proctor Estándar .

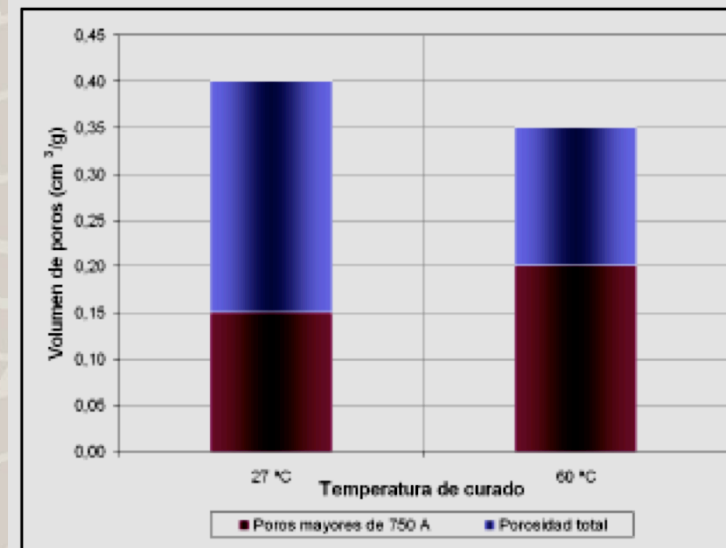


**Efecto de la densidad y la humedad en la contracción (Bhandary, 1973)**

# INFLUENCIA DE LA TEMPERATURA EN MATERIALES CEMENTADOS



Relación entre la temperatura y el tiempo de fraguado del cemento (ACI Commitee E-701)



Efecto de la temperatura en la porosidad total y en tamaño de los poros (Goto and Roy, 1981)



## **IMPACTO DE LA TEMPERATURA EN LA COMPACTACION**

**En Sudáfrica una investigación realizada por Botha et al, demostró que el rápido fraguado del cemento es definitivamente la razón por la cual el material no puede ser compactado a la densidad optima**

**En España las Especificaciones de capas cementadas recomiendan el uso de retardadores de fraguado con climas calurosos.**





# DISEÑO DE CAPAS CEMENTADAS

**METODO AASHTO 93 - EMPIRICO**

**APLICABLE SOLO A BASES CEMENTADAS**

**Y**

**¡¡ NUNCA A SUB BASES !!**

**METODOS EMPIRICOS - MECANISTICOS**

**FISURACION POR FATIGA EN LA FIBRA INFERIOR DE LA  
CAPA CEMENTADA**



## ECUACIONES DE TRANSFERENCIA

$$N_{eff} = 10^{6,72} \left(1 - \frac{\epsilon}{7,49\epsilon_b}\right) \text{ para rutas de categoría "A"}$$

$$N_{eff} = 10^{6,84} \left(1 - \frac{\epsilon}{7,63\epsilon_b}\right) \text{ para rutas de categoría "B"}$$



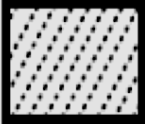

$$N_{eff} = 10^{6,87} \left(1 - \frac{\epsilon}{7,66\epsilon_b}\right) \text{ para rutas de categoría "C"}$$

$$N_{eff} = 10^{7,06} \left(1 - \frac{\epsilon}{7,86\epsilon_b}\right) \text{ para rutas de categoría "D"}$$

**OBTENIDAS POR ENSAYOS PARA CADA TIPO Y  
CARACTERISTICAS DEL MATERIAL**

# METODO SUDAFRICANO

## CODIFICACION DE MATERIALES CEMENTADOS

Symbol	Code	Material	Abbreviated specification
	C1	Cemented crushed stone or gravel	UCS 6 - 12 MPa at 100 % mod. AASHTO compaction; at least G2 before treatment
	C2	Cemented crushed stone or gravel	UCS 3 - 6 MPa at 100 % mod. AASHTO compaction; at least G2/G4 before treatment
	C3	Cemented natural gravel	UCS 1,5 - 3,0 MPa and ITS $\geq$ 250 kPa at 100 % mod. AASHTO; max size 63 mm; PI $\leq$ 6 after treatment
	C4	Cemented natural gravel	UCS 0,75 - 1,5 MPa and ITS $\geq$ 200 kPa at 100 % mod. AASHTO; max size 63 mm; PI $\leq$ 6 after treatment

**EN TODOS LOS CASOS LOS MATERIALES CEMENTADOS ESTAN  
 CONSTITUIDOS POR PIEDRAS TRITURADAS O GRAVAS  
 NATURALES**



- **Categoría C1:** deben ser tratados materiales que correspondan a materiales de al menos categoría G2
- **Categoría C2:** deben ser tratados materiales que correspondan a materiales granulares de las categorías G2, G3 o G4

<b>Code</b>	<b>Material</b>	<b>Abbreviated specification</b>
G1	Graded crushed stone	Dense-graded, unweathered crushed stone; Max size 37,5 mm; 88% apparent density; PI < 4,0 (min 6 tests)
G2	Graded crushed stone	Dense-graded crushed stone; Max size 37,5 mm; 100 - 102 % mod. AASHTO or 85% bulk density; PI < 6,0 (min 6 tests)
G3	Graded crushed stone	Dense-graded crushed stone and soil binder; max size 37,5 mm; 98 - 100% mod. AASHTO; PI < 6
G4	Natural Gravel	CBR <sub>r</sub> 80; max size 53 mm; 98 - 100 mod. AASHTO; PI < 6; Swell 0,2 @ 100 % mod. AASHTO



- **Categoría C3:** deben ser tratados materiales que correspondan a las categorías G5 o G6
- **Categoría C4:** deben ser tratados materiales que correspondan a las categorías G5 o G6

**G5** Natural Gravel CBR<sub>f</sub> 45; max size 63 mm or  $D$  of layer thickness; density as prescribed for layer of usage; PI < 10; Swell 0,5 @ 100 % mod. AASHTO

**G6** Natural Gravel CBR<sub>f</sub> 25; max size 63 mm or  $D$  of layer thickness; density as prescribed for layer of usage; PI < 12 or  $2(GM)+10$ ; Swell 1,0 @ 100 % mod. AASHTO



# NORMA TRH 14 (SUDAFRICA)

**Table 59. TRH14 Classification of Cementitiously Stabilised Materials**

Class	C1	C2	C3	C4
Material Class Before Stabilisation	G2	G2/G3/G4	G5/G6	G5/G6
<b>Aggregate Quality Before Stabilisation</b>				
Grading (Sieve size, mm)	Nominal Maximum Size of Aggregate (percent passing)		Maximum size in place after compaction should not exceed two thirds of the compacted layer thickness, or 63 mm, whichever is the smaller.	
	38 mm	28 mm		
38	100			
37.5	95 – 100			
28	90 – 100	100		
26.5	78 – 98	88 – 98		
20	75 – 95	85 – 95		
19.0	68 – 88	74 – 86		
14	65 – 85	71 – 84		
5	48 – 62	45 – 64		
4.75	45 – 60	42 – 60		
2.00	41 – 53	27 – 45		
0.425	30 – 47	13 – 27		
0.075	5 – 12	5 – 12		
Crushing strength ACV (max) or 10% FACT (min)	29%		Not applicable	
	110 kN			
Flakiness Index	Max 35%		Not applicable	
Sand Equivalent	Max 30% for any sand added to correct the grading		Not applicable	
<b>Design Strength of Stabilised Materials</b>				
Class	C1	C2	C3	C4
Unconfined compressive strength: (UCS) at 7 days, 100% MDD	Min 6 Max 12	Min 3 Max 6	Min 1.5 Max 3.0	Min 0.75 Max 1.5
Atterberg Limits after Stabilisation	Not applicable		Max 6	

## NORMA TRH 14 (SUDAFRICA)

**Table 60. Additional Standards for Cementitiously Stabilised Materials**

Classification	C1	C2	C3	C4
Material before treatment	At least G2 quality	At least G4 quality	At least G5 quality	At least G6 quality
PI after treatment	Non-plastic	Non-plastic	6 max <sup>1</sup>	6 max <sup>1</sup>
UCS (MPa) <sup>2</sup>	6 min	4 min	1.5 min	0.75 min
ITS (kPa) <sup>3</sup>	–	–	250 min	200 min
Wet/dry durability (% loss) <sup>4</sup>	5 max	10 max	20 max	30 max

**Material G5** should have a CBR after soaking of not less than 45 per cent at 95 per cent Mod. AASHTO density and a maximum swell of 0,5 per cent at 100 per cent Mod. AASHTO density.

In the drier areas of the country ( $N > 10$ ; see Figure 2A, Appendix A) and in the case of very lightly trafficked roads ( $AADT < 300$  vpd) this requirement may be relaxed if the subbase layer has a cover of 150 mm or greater. In such cases the minimum CBR at 95 per cent Mod. AASHTO density should not be less than 25.



## NORMA TRH 14 (SUDAFRICA)

**TABLE 14**

*CBR and swell requirements for gravel and gravel-soil (G6, G7, G8, G9 and G10)*

Property	Material type				
	G6	G7	G8	G9	G10
Minimum CBR at 93 per cent Mod. AASHTO density (%)	25	15			
Minimum CBR at in-situ density (%)	—	—	10	7	3
Maximum swell at 100 per cent Mod. AASHTO density (%)	1,0	1,5	1,5	1,5	1,5





# CONSTRUCCION DE CAPAS CEMENTADAS

## ELABORACION DE LA MEZCLA

### EN PLANTA

- **MAS HOMOGENEA**
- **MENOR VARIABILIDAD**



### EN EL SITIO

- **MENOS HOMOGENEA**
- **MAYOR VARIABILIDAD**



*PARA MEZCLADO EN EL SITIO, SE ESPECIFICA UNA TASA MAYOR DE CEMENTO A COSTO DEL CONSTRUCTOR*



## ESPESOR DE CAPA

### ❑ MEZCLA DE PLANTA

- **ESPESOR UNIFORME**
- **CONTROL DE CAPA DE ASIEN TO**



### ❑ EN EL SITIO

- **ESPESOR INCIERTO**
- **POSIBILIDAD DE AFECTACION DE CAPA DE ASIEN TO**





# CONTROL DE FISURACION DE CAPAS DE SUELO CEMENTO

## PRECORTE DE BASE CEMENTADA

ASERRADO DE CAPA CON  
ESPACIAMIENTO DE  
APROXIMADAMENTE 3 M Y SELLADO  
POSTERIOR CON EMULSION ASFALTICA





## MICROFISURACION

Investigadores Austriacos (Litzka y Haslehner, 1995) iniciaron un programa de prefisuración de la capa de suelo cemento en etapas tempranas, reportando que 5 pases del rodillo lleva a satisfactorios resultados, creando una red de microfisuras con lo cual es eliminado el desarrollo de grandes fisuras de retracción



(a) Dry Cured

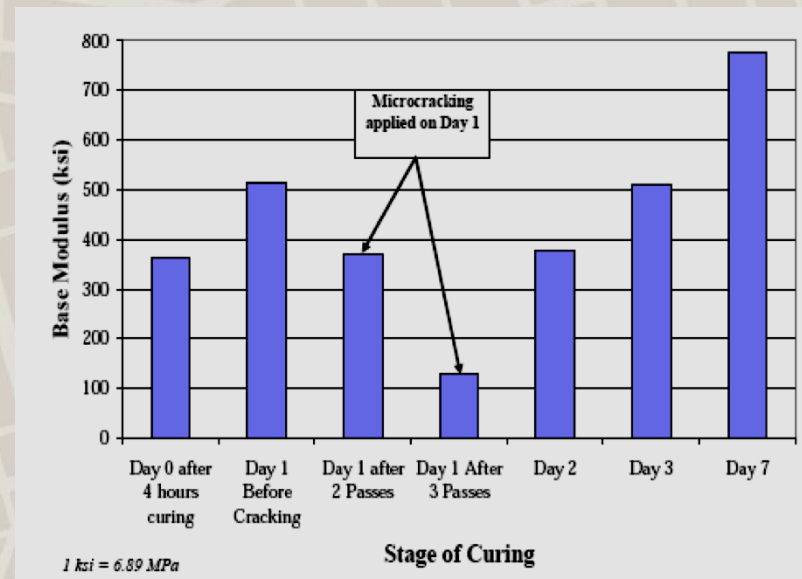


(b) Microcracked at 3 Days Cure

En el 2003 fueron construidas en el Riverside Campus de la Texas A&M, pistas de prueba para ensayos de microfisuración sobre bases tratadas con cemento. Las observaciones realizadas respaldan cuanto sigue:

- La Microfisuración reduce la severidad de las fisuras de retracción en la base, independientemente del contenido de cemento, y en algunos casos también reduce significativamente la longitud total de fisuras.

- Cuando es apropiadamente aplicada, La Microfisuración no produce daño en el pavimento. La superficie no se quiebra y el modulo de la base se recupera.





# **CURADO Y CUIDADOS POSTERIORES DE CAPAS CEMENTADAS**

**MANTENER LA SUPERFICIE DE LA CAPA EN  
CONDICIONES DE HUMEDAD PERMANENTE  
PERMITE:**

- OBTENER LA RESISTENCIA DE DISEÑO**
- REDUCIR LA FORMACION DE FISURAS**
- EVITAR GRADIENTES DE HUMEDAD**



**EN CASO DE CURADO POR MEDIO DE UNA MEMBRANA ASFALTICA  
SE REQUIERE LA APLICACIÓN DE UNA CAPA SUPERIOR DE ARENA  
PARA EVITAR LA ABSORCION DE RADIACION SOLAR Y LA  
FORMACION DE GRADIENTES DE TEMPERATURA EN LA CAPA.**



**EN CASO DE SER REQUERIDA LA CIRCULACION DE VEHICULOS Y EQUIPOS DE OBRA SOBRE LA CAPA DE SUELO CEMENTO RECIEN CONSTRUIDA, LA NORMATIVA BRASILEIRA RECOMIENDA LA EJECUCION DE UNA CAPA SUPERIOR DE TIERRA DE 15 CM DE ESPESOR A FIN DE PROTEGERLA.**



## CONCLUSIONES

- LA PRACTICA ACTUAL ES REALIZADA CON PROCEDIMIENTOS NO SIEMPRE ADECUADOS O DEBIDAMENTE UTILIZADOS
- EL CONOCIMIENTO DEL TEMA ESTA BASADO EN CRITERIOS QUE SE ENCUENTRAN ENTRE EL MITO Y LA REALIDAD
- LOS RESULTADOS NO SIEMPRE SON EFECTIVOS NI DURADEROS





**POR TANTO, A FIN DE ASEGURAR LA CALIDAD Y DURABILIDAD DE LA INFRAESTRUCTURA VIAL, QUE INCORPORA EN SU ESTRUCTURA CAPAS CEMENTADAS, EN NUESTRO PAIS SE REQUIERE LA REALIZACION DE ESTUDIOS E INVESTIGACIONES PARA LA ELABORACION DE UNA NORMATIVA PARA EL DISEÑO Y LA CONSTRUCCION DE CAPAS ESTRUCTURALES DE PAVIMENTOS CONSTRUIDAS CON MATERIALES TRATADOS CON CEMENTO**



**¡¡MUCHAS GRACIAS!!**