

■ CONGRESO PARAGUAYO

2do

# Vialidad y Tránsito

6 y 7 de Octubre 2016 | Encarnación  
EXPO VIAL | Paraguay



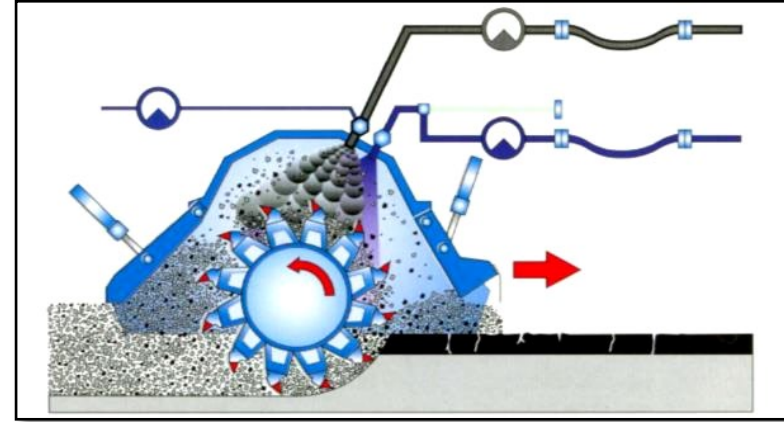
# Propiedades y Análisis Estructural Capas Estabilizadas con Asfalto en Frio y Cemento Estado de la Práctica

**Relator:**  
**Felipe Halles**



# Alcances

- Mezclas recicladas/estabilizadas con asfalto espumado (\*) y cemento (\*) Incluye Emulsión?



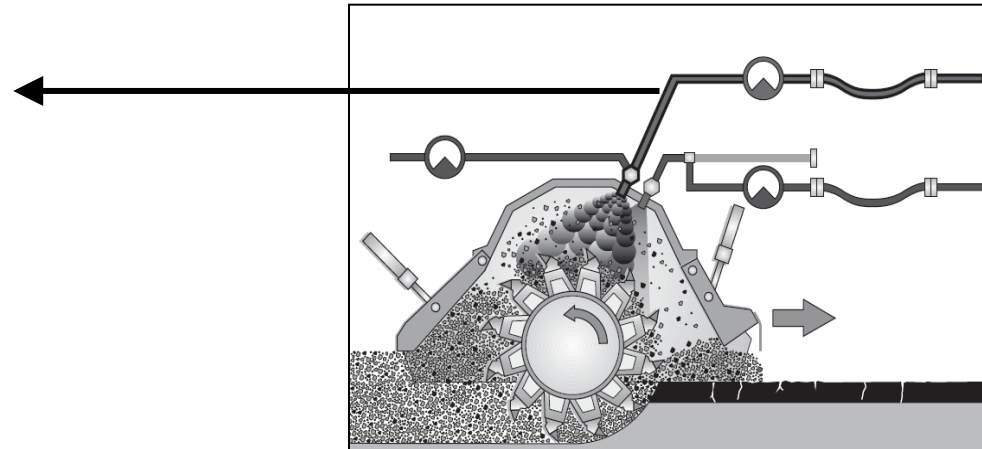
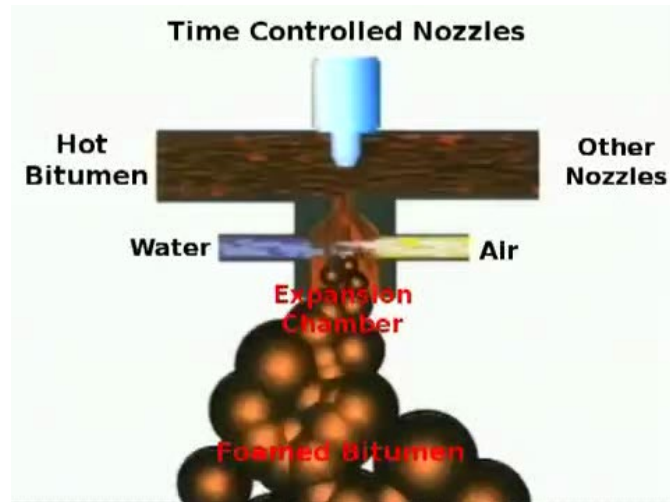
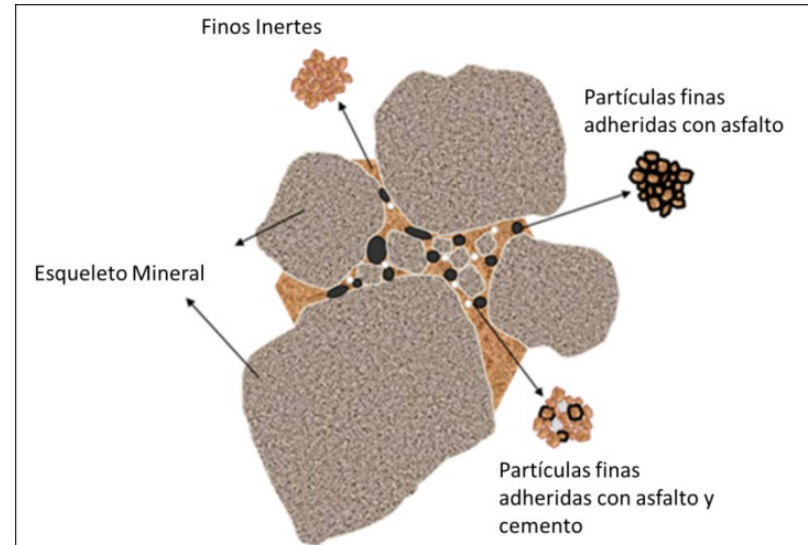


# Alcances

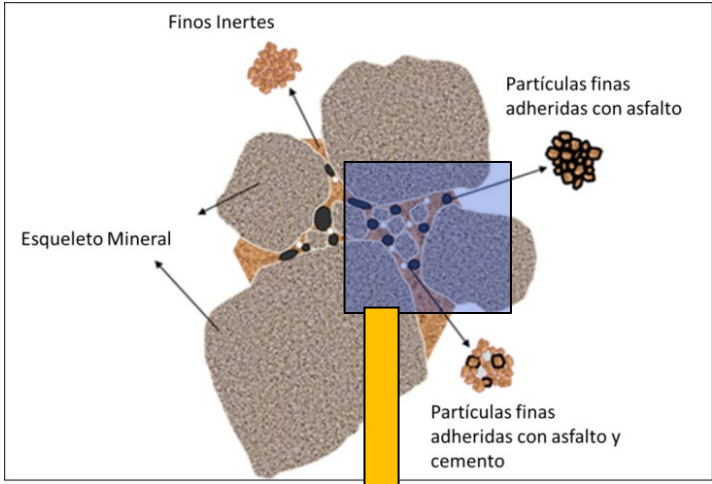
Para entender los conceptos que gobiernan el comportamiento, es necesario saber **cómo está compuesto y el modo de falla de este tipo de mezclas**

Mezcla compuesta por:

- Materiales (reciclados o vírgenes) con finos
- Asfalto (1,0 – 3,0%)
- Agua (% Humedad óptima de compactación)
- Filler Activo (0,0 – 2,0%) (Normalm. Cemento)



# Alcances



Variable:  
Contenido de Asfalto



Contenido Asfalto





# Alcances

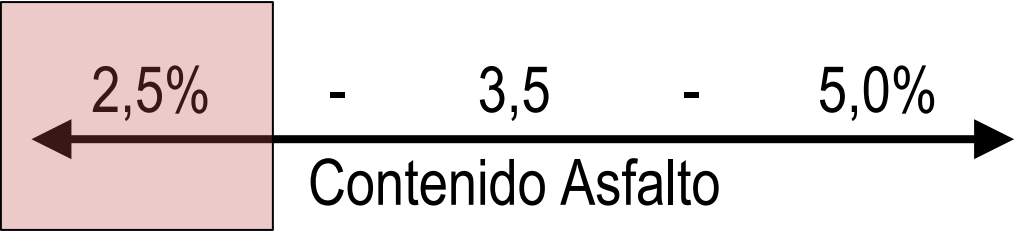
Asfalto de 2,0 – 3,0% → Sudáfrica, xAustralia, Chile, NZ, xEEUU (**MR = 800 MPa**)

Asfalto de 3,0 – 4,0% → Italia, xAustralia, xEEUU, otros (**MR = 2000 MPa**)

Asfalto de 4,5 – 5,5% → Mezcla Asfáltica (**MR = 4000 MPa**)

MR: Módulo Resiliente Triaxial

**Modo de Falla es Distinto  
SemiFragil/Deformación**



# Objetivo de la presentación

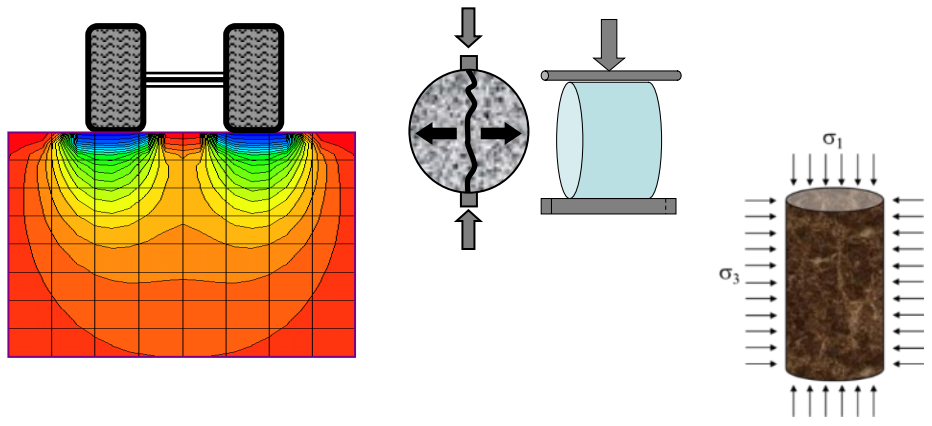
¿ Entender si es (o no) posible utilizar este tipo de mezclas en Paraguay ?



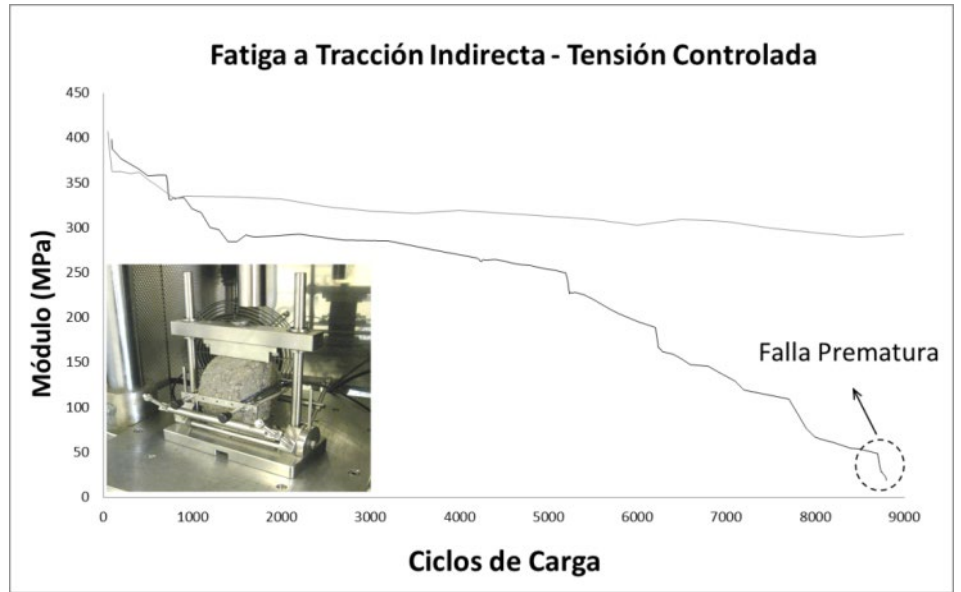


# Análisis de Puntos Críticos

a) Comportamiento Mecánico  
(Corto-Mediano Plazo)  
Rol de los aditivos  
(Asfalto y cemento)



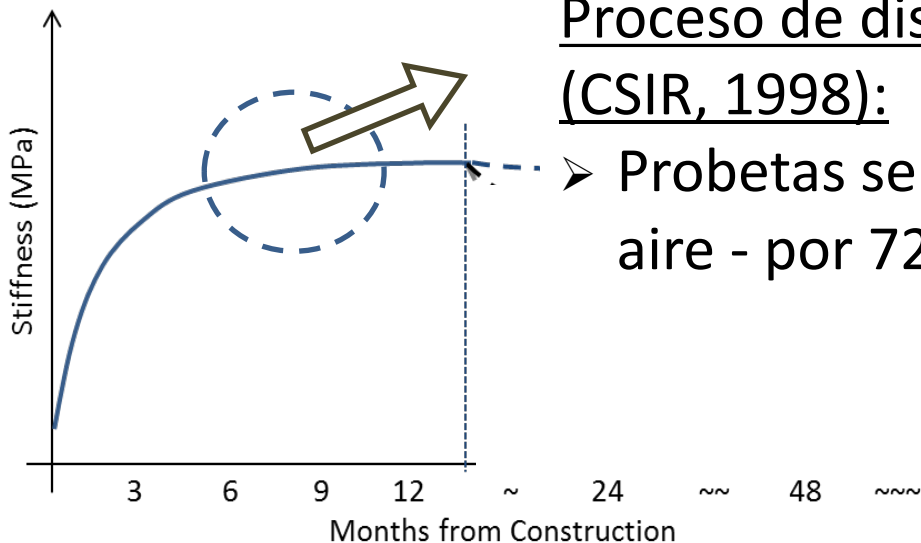
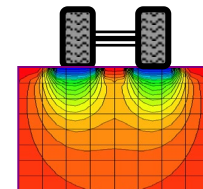
b) Resistencia a la Fatiga  
(Largo Plazo)





# Análisis Corto – Mediano Plazo

Proceso Aumento Rigidez: Mezclas con Asfalto Espumado no desarrollan su máxima resistencia hasta que el agua del proceso de mezclado se haya evaporado por completo (Bowering, 1970)



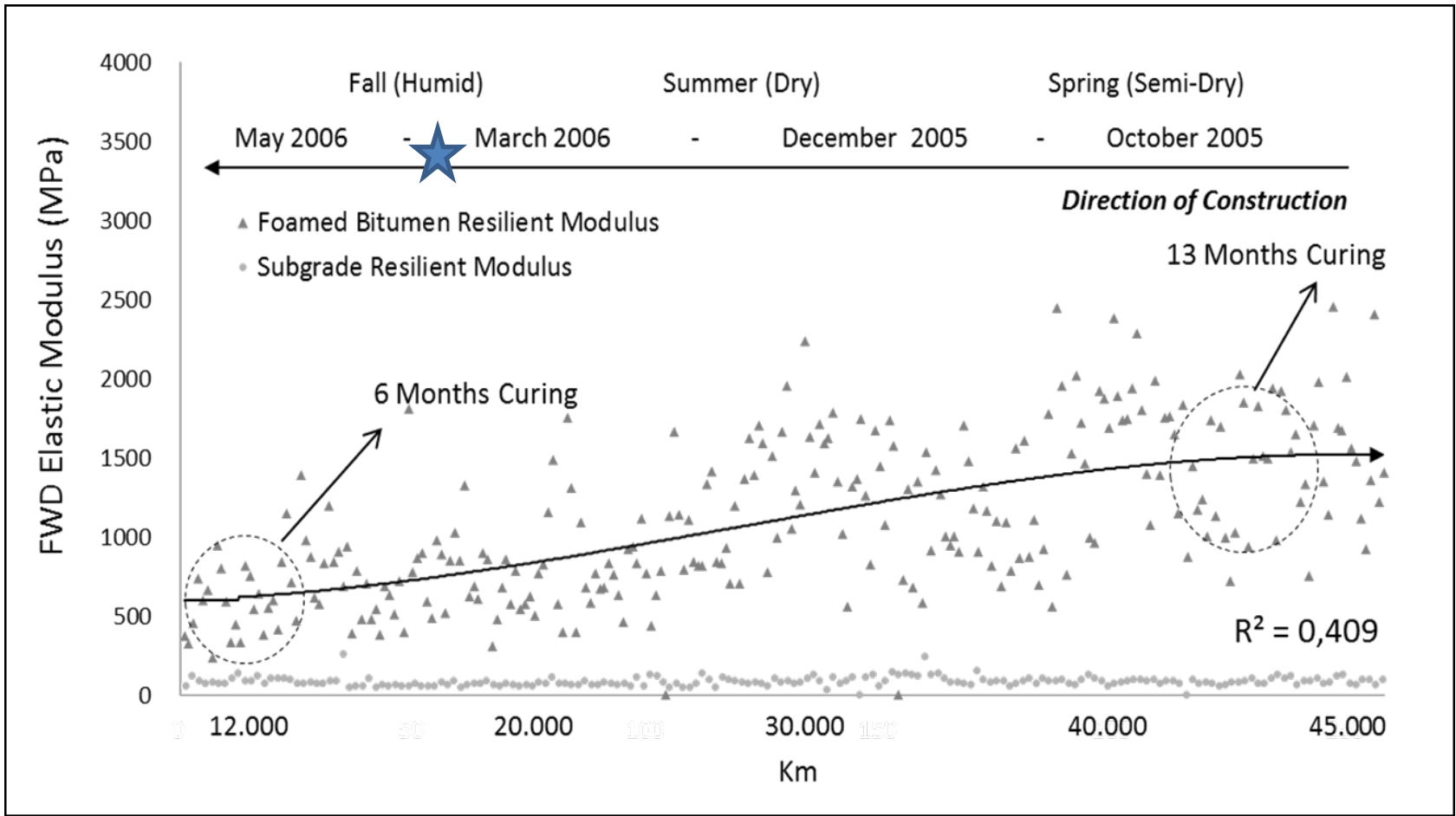
Proceso de diseño de mezclas (curado acelerado) (CSIR, 1998):

➤ Probetas se curan en horno - con circulación de aire - por 72 hrs a 40° C



- Se cumple esto en terreno?
- Cuales son los factores que afectan?

# Análisis Corto – Mediano Plazo



Retroanálisis Deflectometría de Impacto Camino La Madera, VIII Región  
Noviembre 2006

# Análisis Corto – Mediano Plazo

Para que curado (pérdida de humedad) suceda exitosamente en terreno las condiciones medioambientales deben estar controladas:

- Suficiente calor
- Humedad ambiental «normal»
- Condiciones de borde favorables (**materiales no plásticos, saneamiento adecuado**, entre otros)



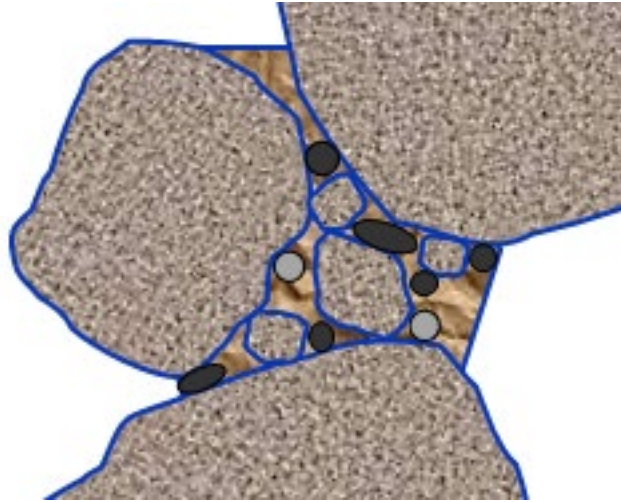


# Análisis Corto – Mediano Plazo

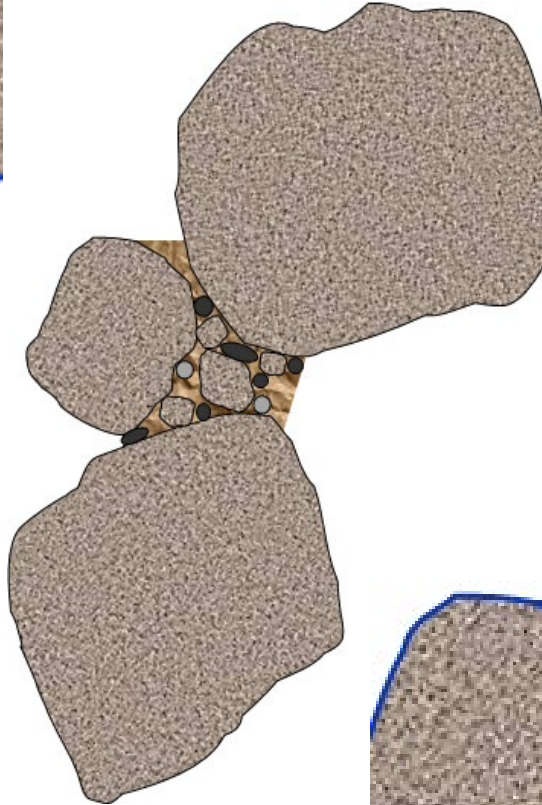


# Análisis Corto – Mediano Plazo

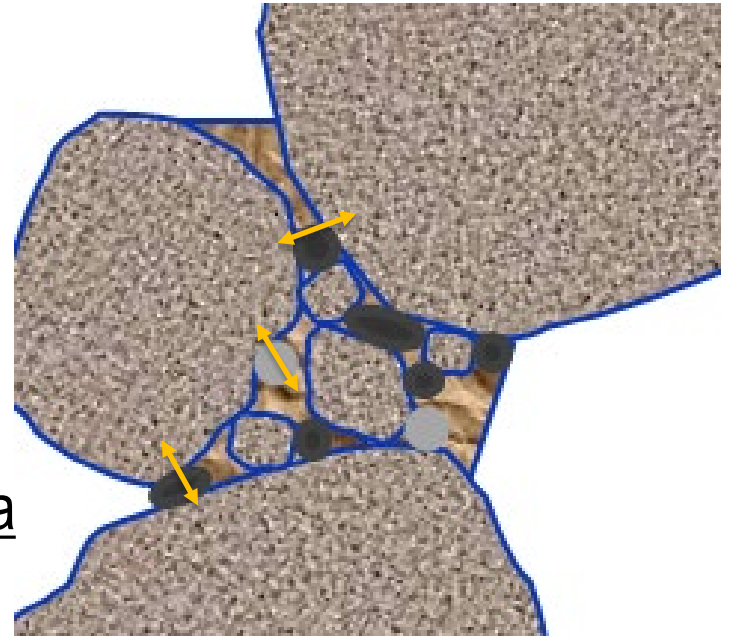
Descripción conceptual del proceso de pérdida de humedad y adquisición de resistencia



Mezcla inicial



Mezcla curada



Mezcla curada y saturada

(Fuente: Halles, 2013.)



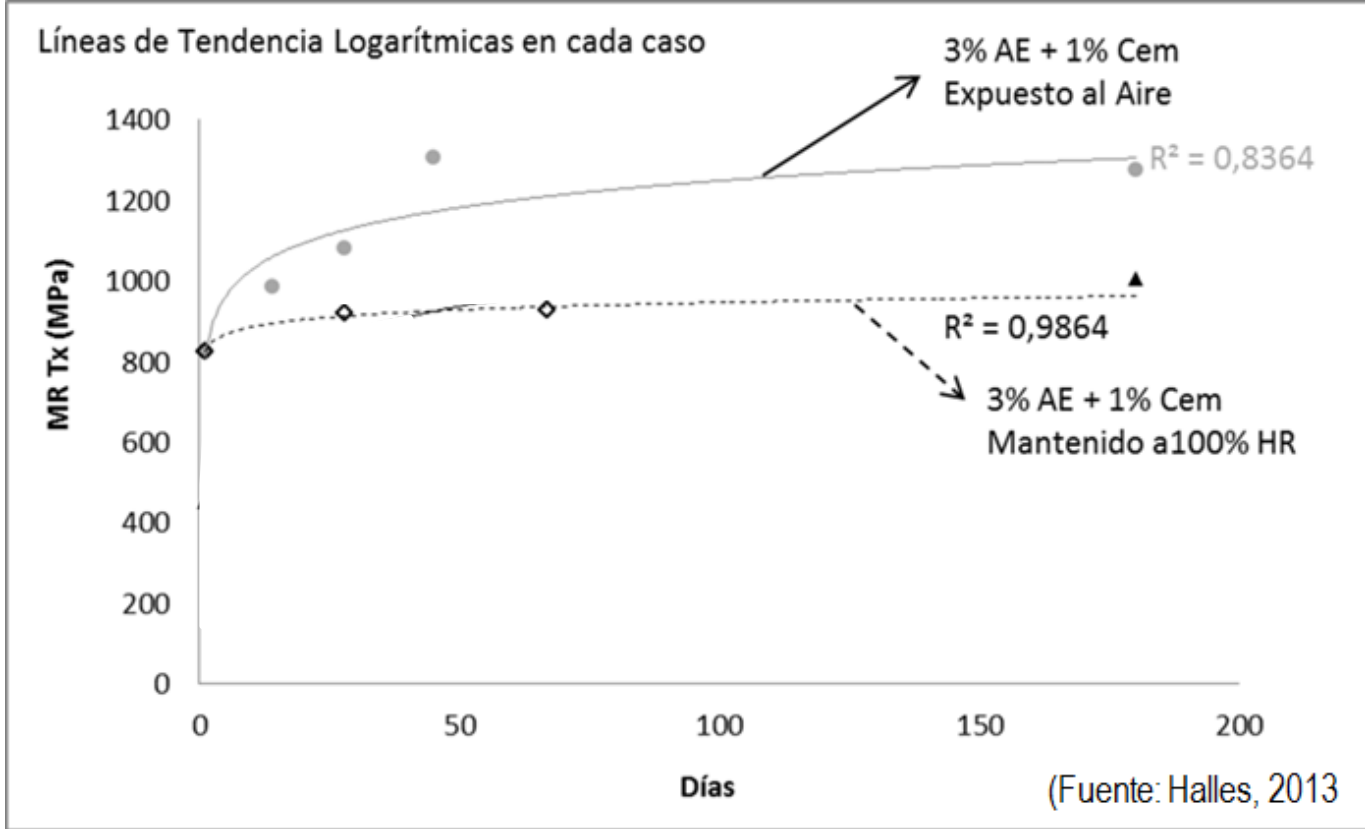
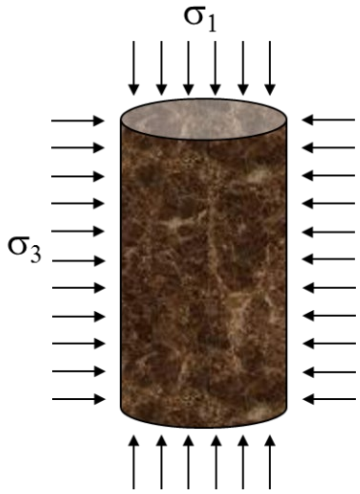
# Análisis Corto – Mediano Plazo



Uso Planta Móvil, para pretratamiento del material para “matar” plasticidad y aprovechar de corregir granulometría.



# Análisis Corto – Mediano Plazo

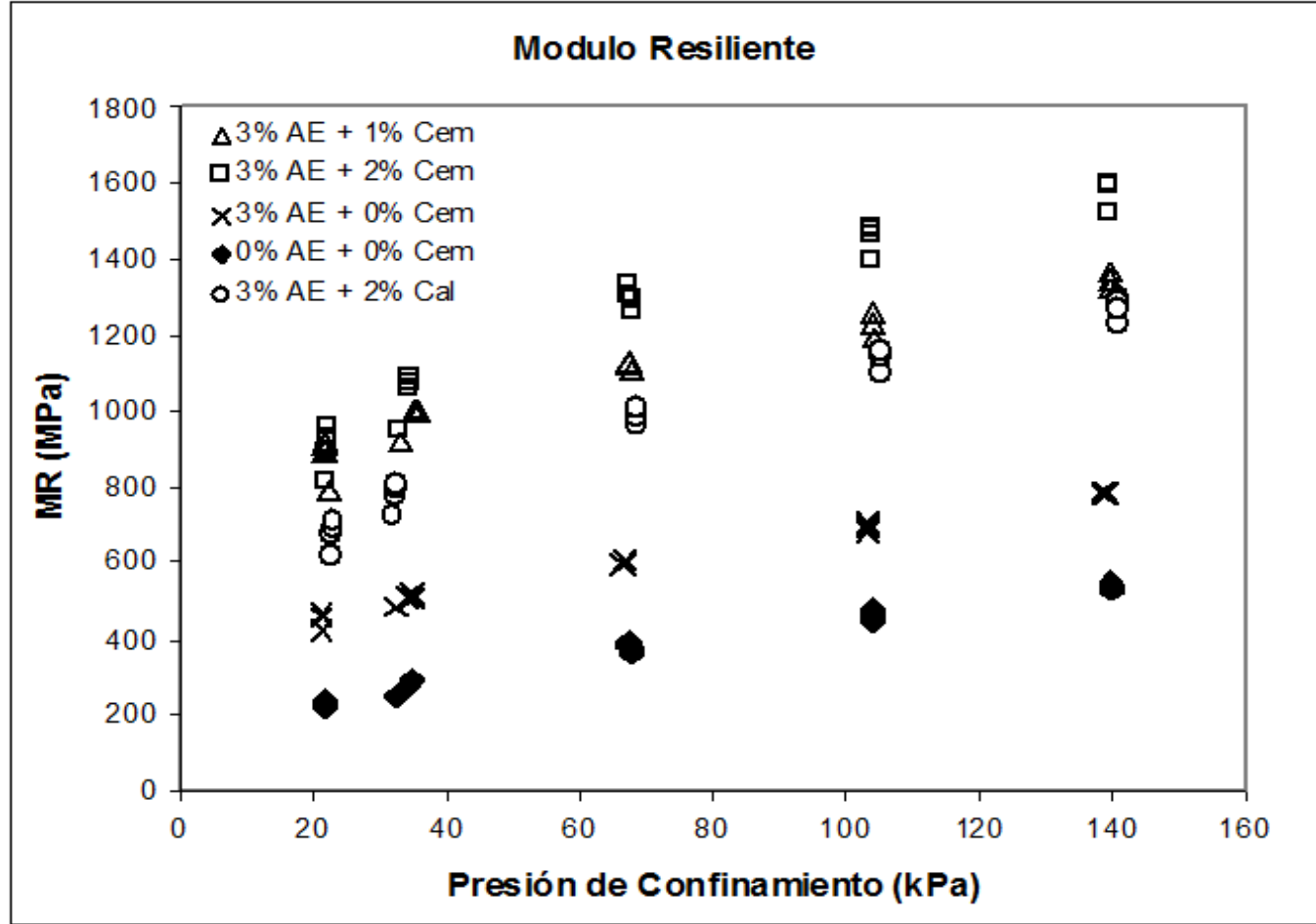
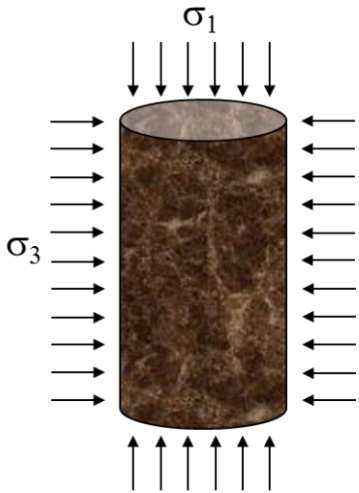


Probetas triaxial de 150 mm diámetro y 300 mm de alto

- 3% AE + 1% Cem (expuesto al aire)
- 3% AE + 1% Cem (Mantenido a 100% Humedad Relativa)

# Análisis Corto – Mediano Plazo → Rol Aditivos

Definición: Rol que juega el Filler Activo, comúnmente Cemento, es tan importante como el rol del Asfalto



# Análisis Corto – Mediano Plazo

## Colocación Cemento.



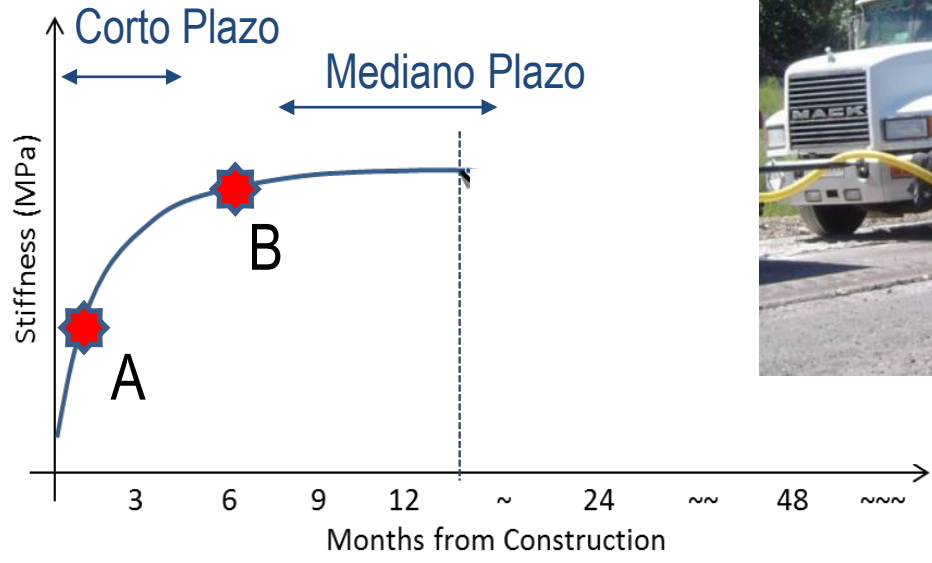


# Análisis Corto – Mediano Plazo

## Manejo Aditivos (Asfalto y Cemento) → Apertura al Tránsito

Una de las ventajas que normalmente «se vende» junto a las tecnologías de reciclado In Situ es que el camino puede abrirse al tránsito inmediatamente

Nota Importante: **Esta afirmación no es válida para todos los casos**

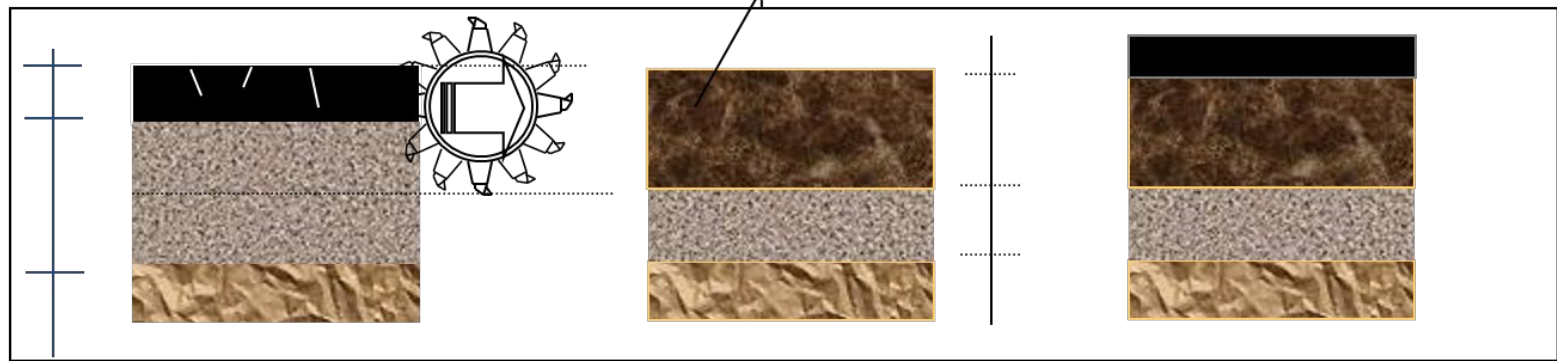


# Análisis Corto – Mediano Plazo

## Manejo Aditivos (Asfalto y Cemento) → Apertura al Tránsito

Proceso Real

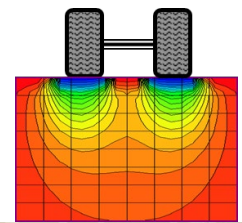
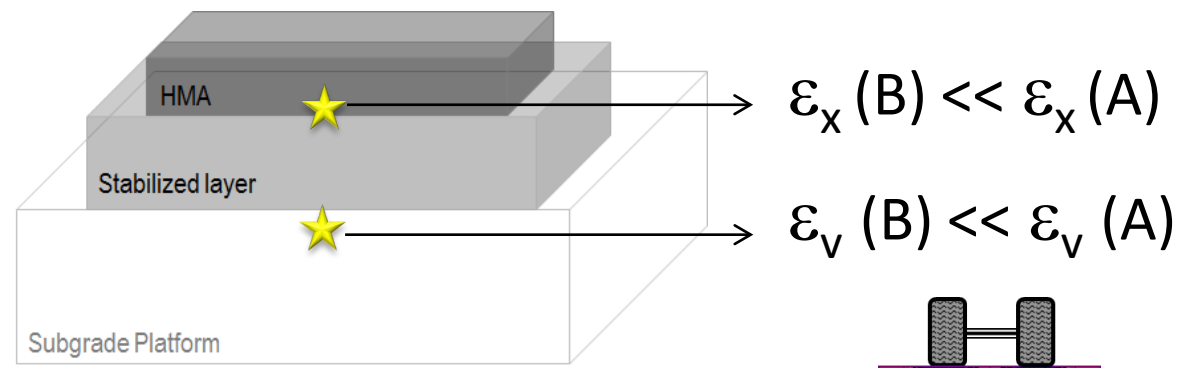
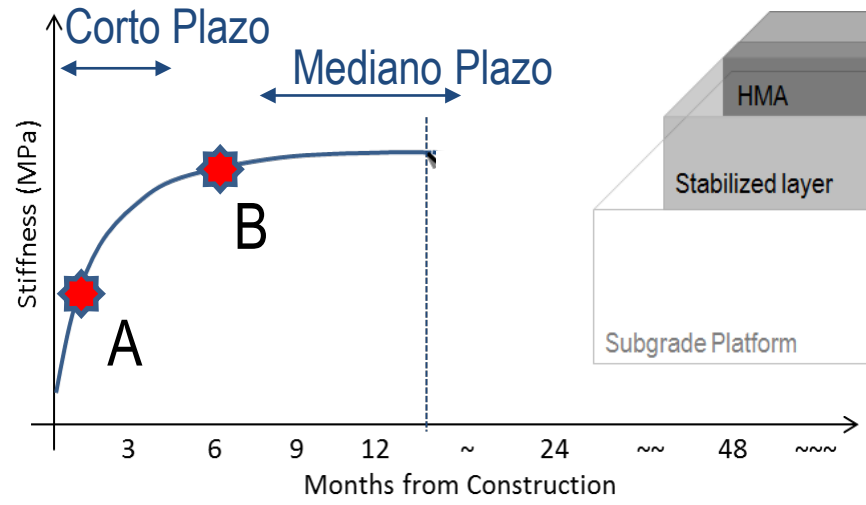
$E$  (MPa) = 20% del utilizado en Diseño



Dia 1

Dia 2 – 3 – 4

Dia 10 - 20



# Análisis Corto – Mediano Plazo

## Manejo Aditivos (Asfalto y Cemento) → Apertura al Tránsito

### Conclusiones:

- Rol del cemento es fundamental ya que es el que aporta resistencia en el corto plazo
- Las propiedades mecánicas deben ser evaluadas no solo en probetas curadas sino también en probetas frescas, para representar las propiedades de corto plazo.

**OJO con el exceso de cemento!!!**

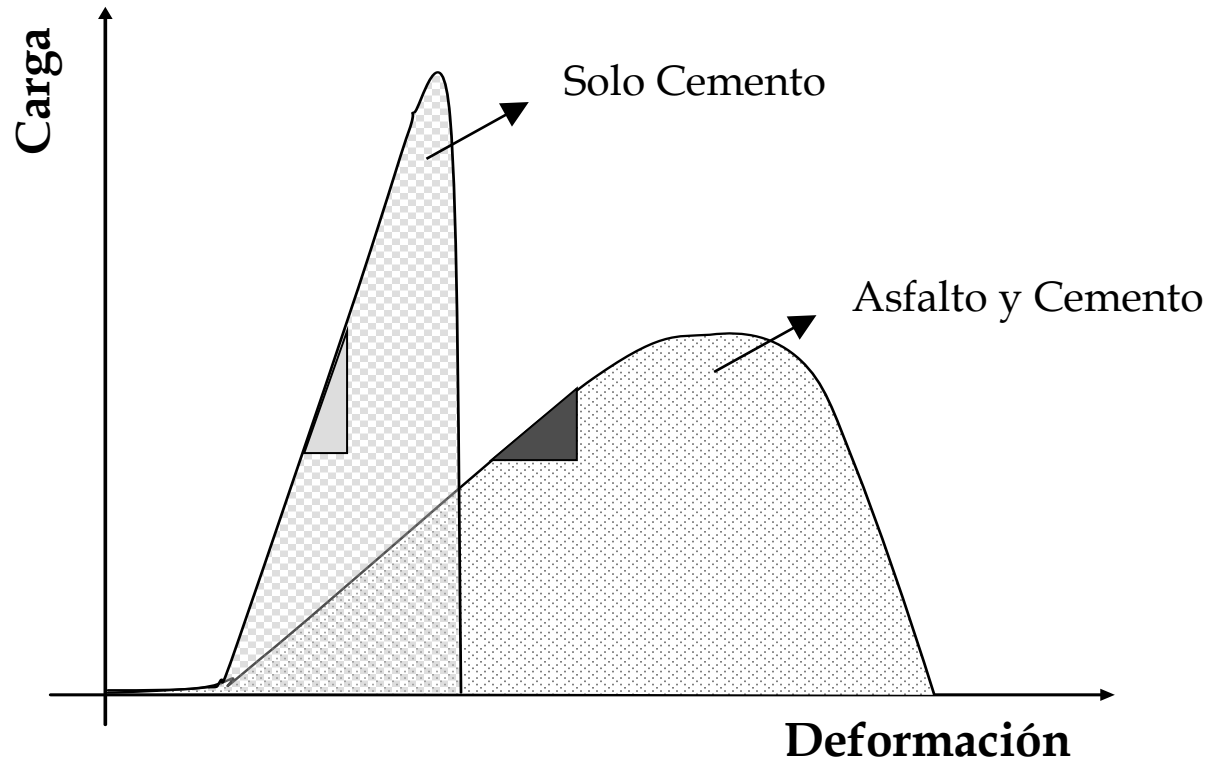
Filler Activo (0,0 – 2,0%)

**Normalmente 1,0%**



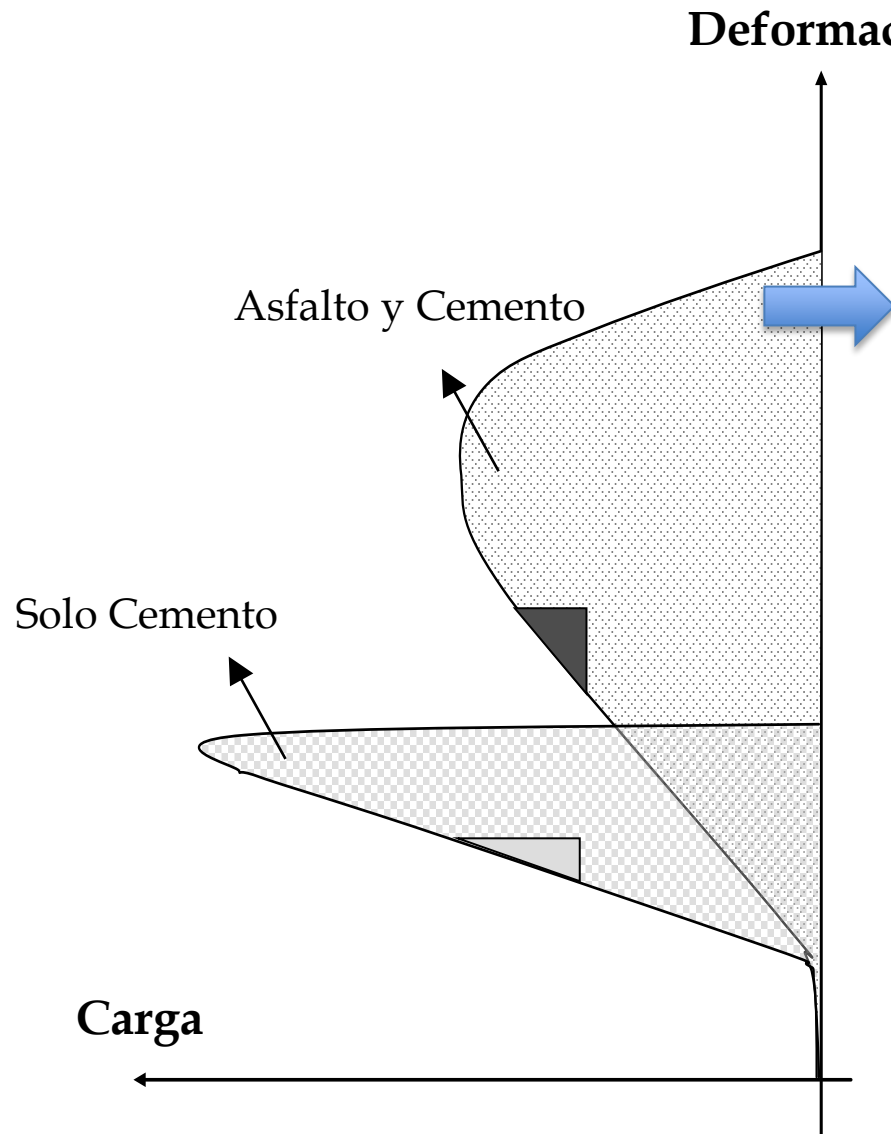
# Análisis Corto – Mediano Plazo

Afirmación: No necesariamente un material con mayor resistencia es el material mas costo-eficiente



Aumento del cemento → Aumenta Resistencia, pero disminuye capacidad de deformación. Mezcla se vuelve frágil

# Análisis Corto – Mediano Plazo



Concepto de Fracture Energy  
(Área bajo la curva)

Capacidad de disipación que tienen los materiales para absorber energía

+ 1.000 probetas fueron evaluadas. Los resultados (entre otros) permitieron demostrar el aporte que produce el asfalto en estos materiales

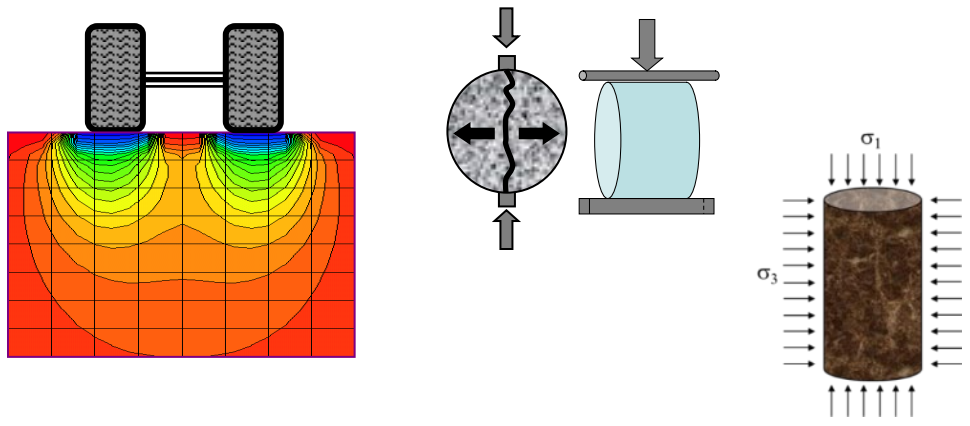
# Análisis Corto – Mediano Plazo



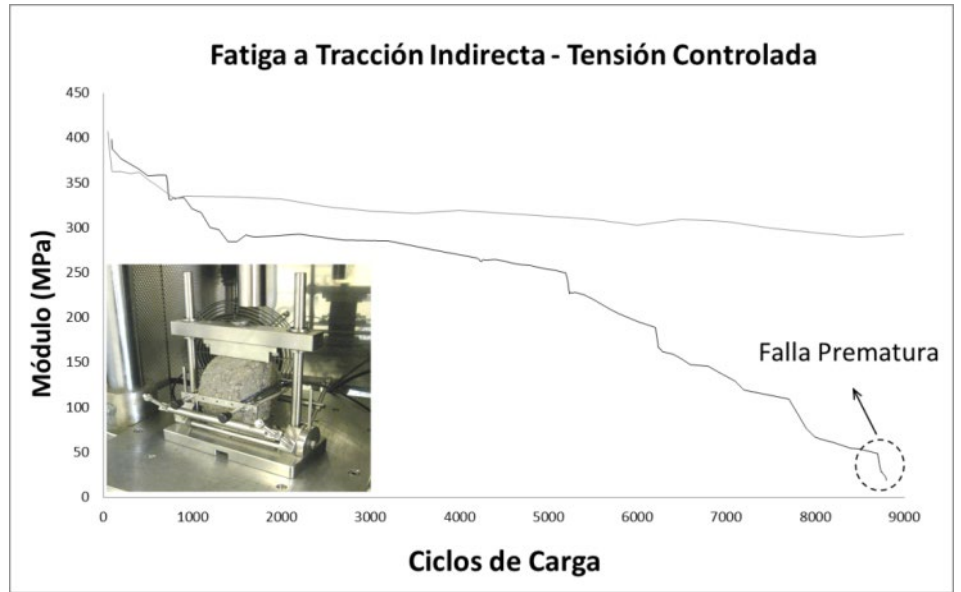


# Análisis de Puntos Críticos

a) Resistencia Mecánica  
(Corto-Mediano Plazo)  
Rol de los aditivos  
(Asfalto y cemento)

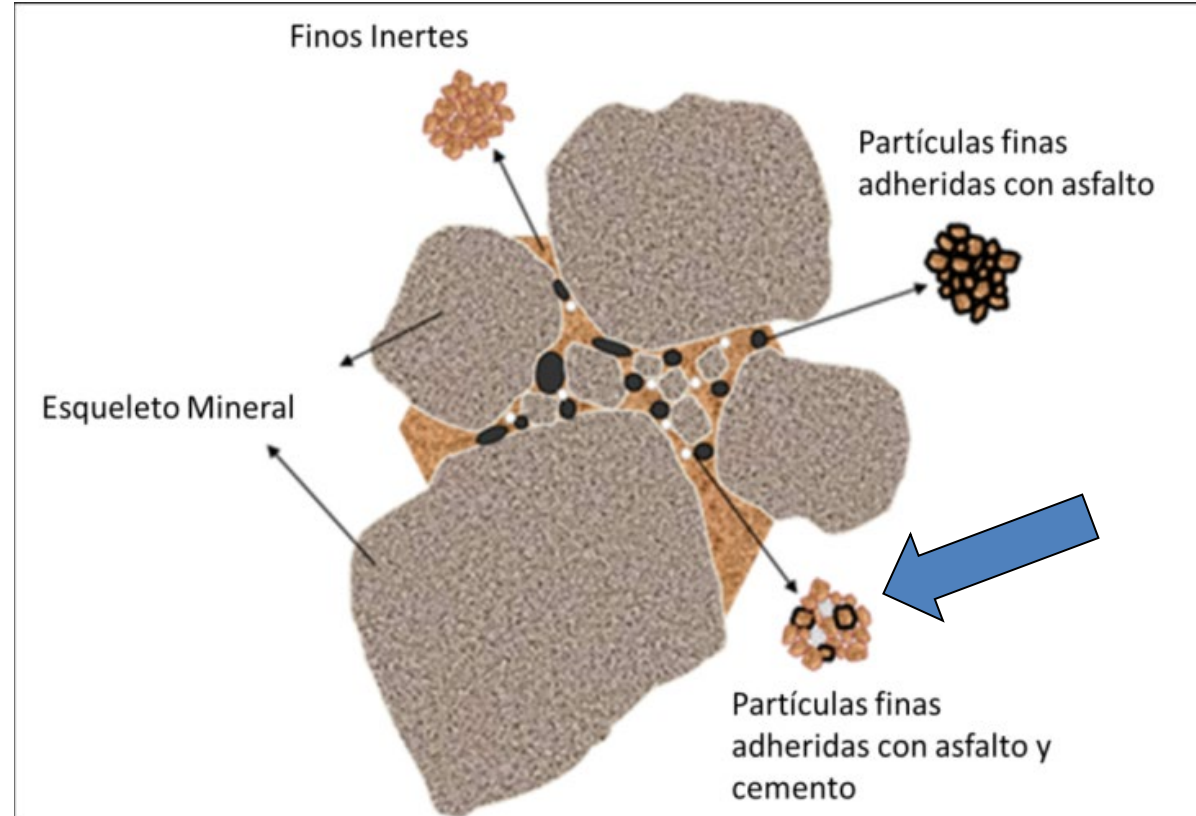
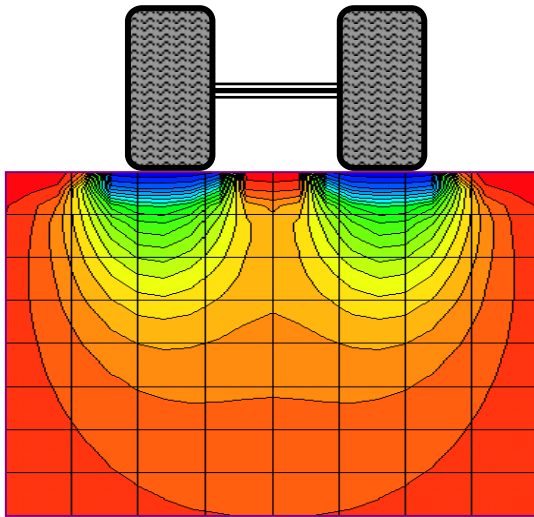


b) Resistencia a la Fatiga  
(Largo Plazo)

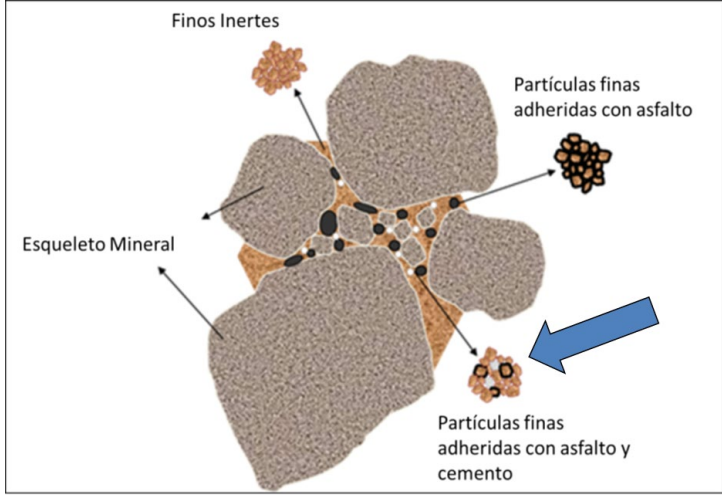
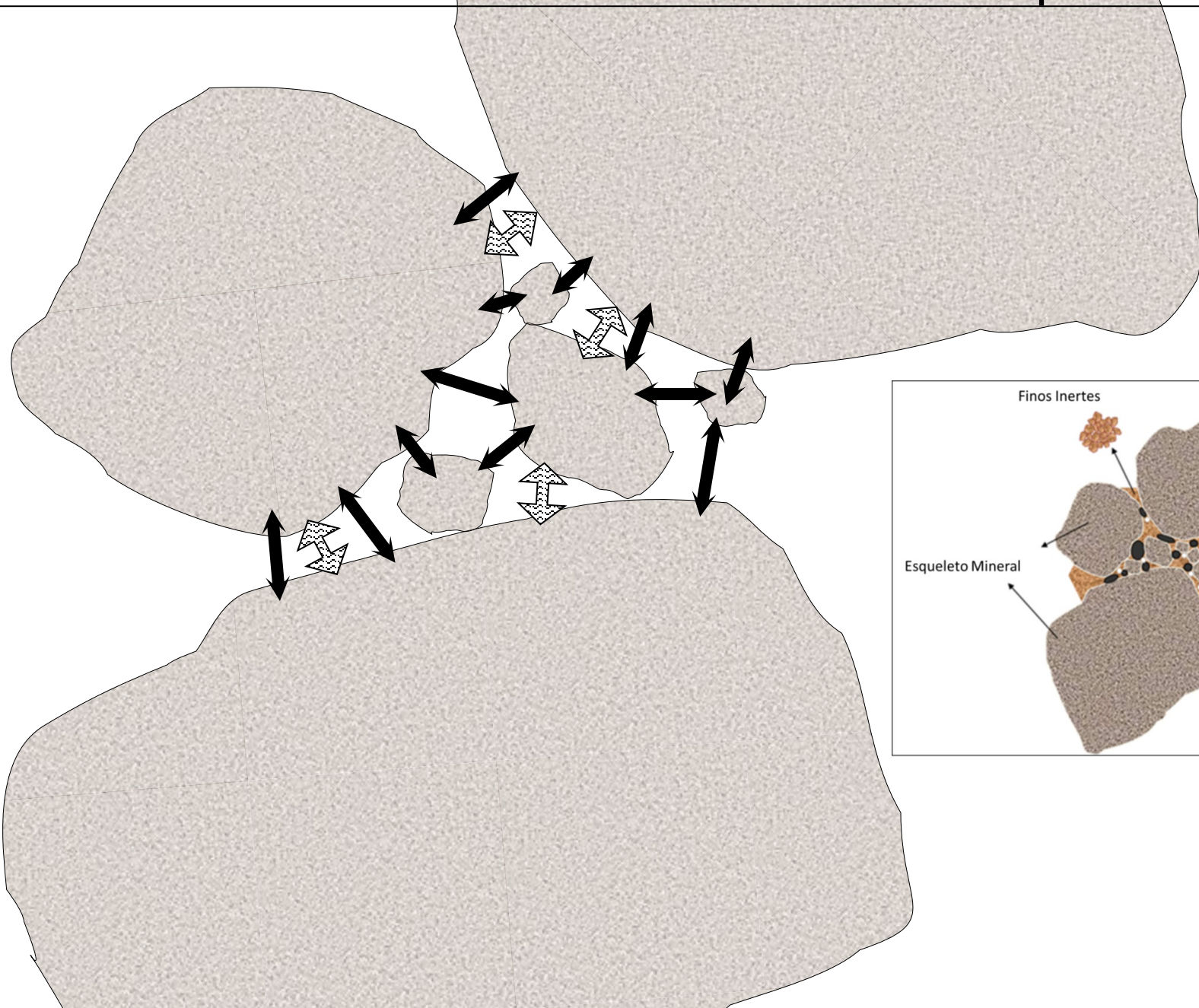


# Análisis Largo Plazo → Diseño Estructural

Que sucede a nivel micromecánico cuando capa reciclada con AE + Cemento es cargado por un vehículo?



# Análisis/Diseño Estructural → Modelo Comportamiento

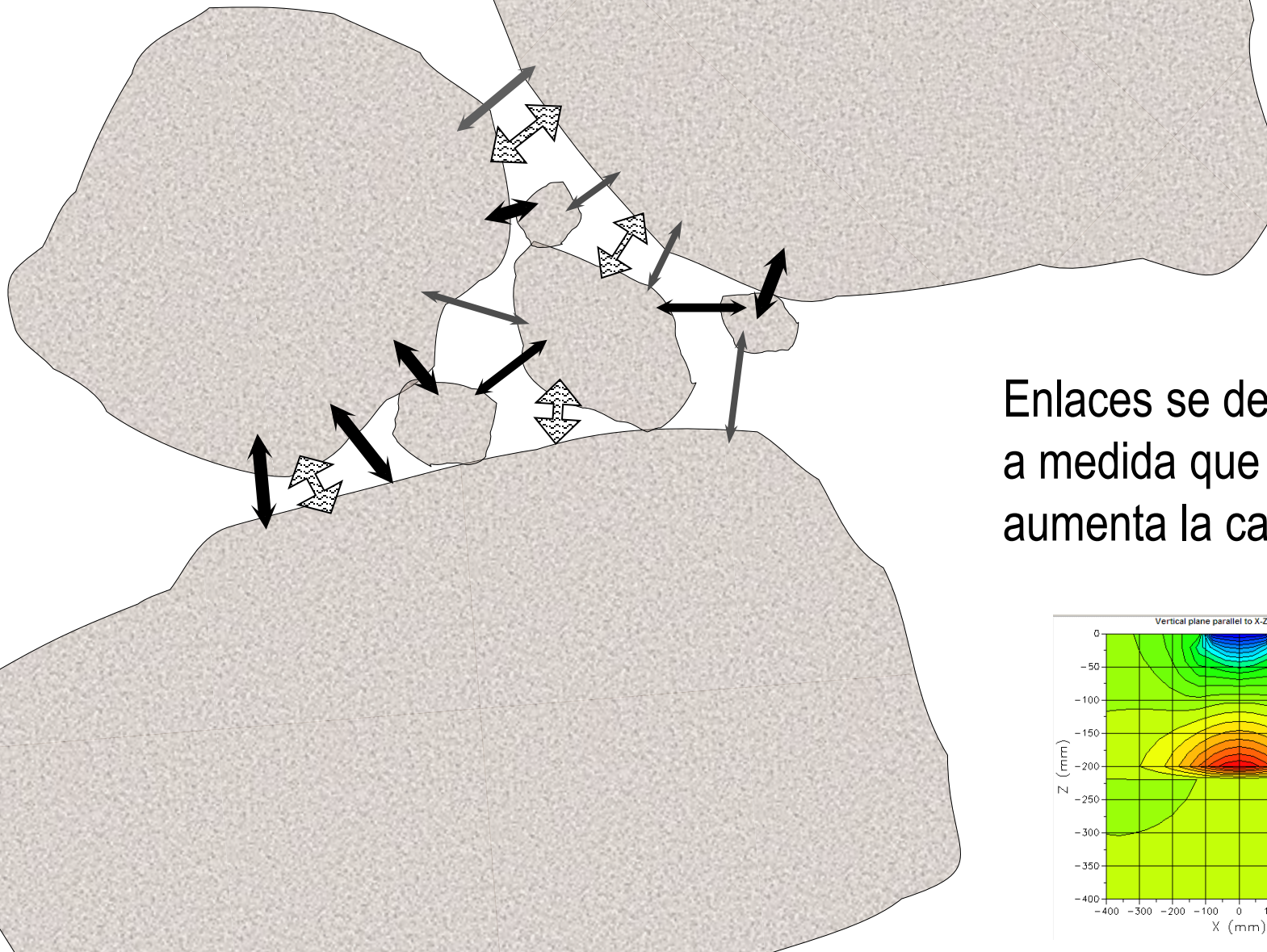


(Fuente: Halles, 2013)

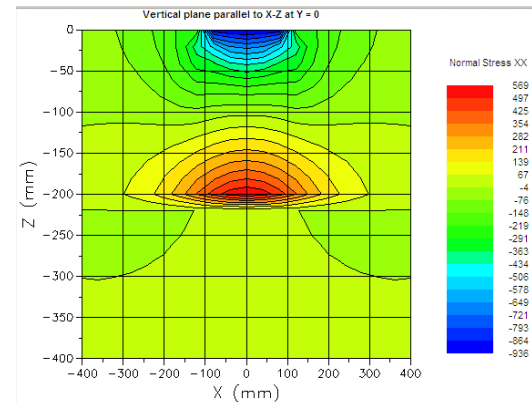




**Carga**



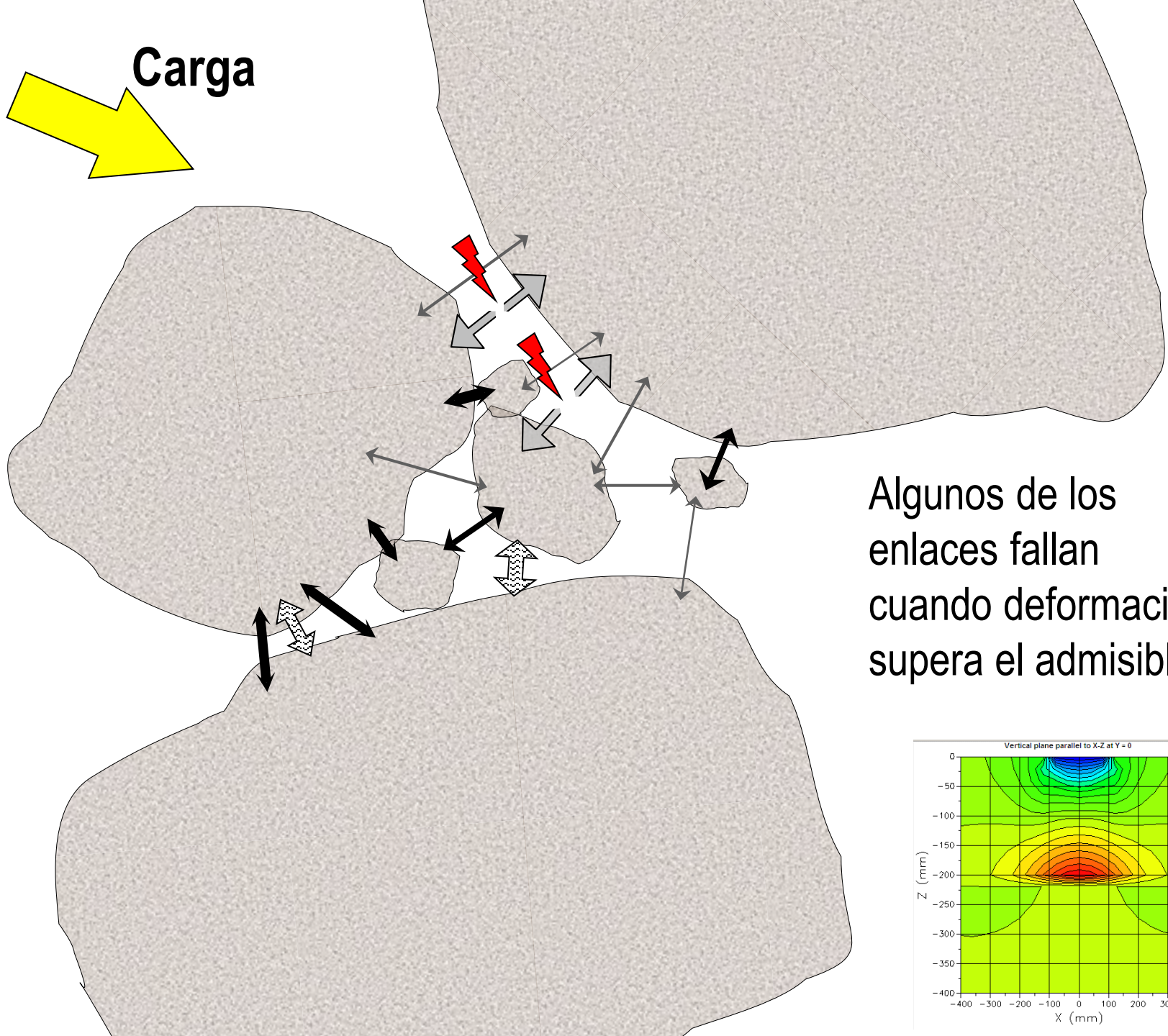
Enlaces se deforman a medida que aumenta la carga



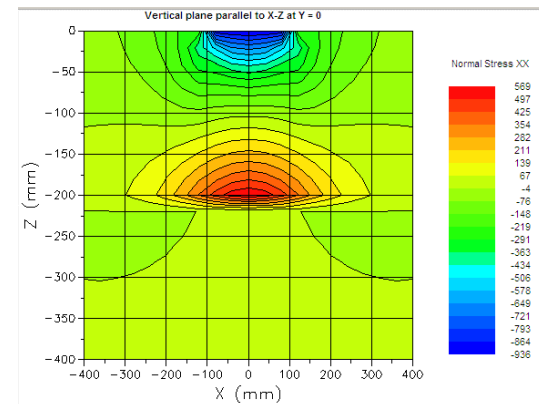




**Carga**



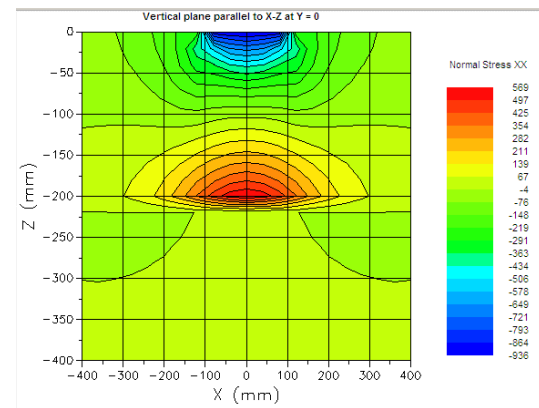
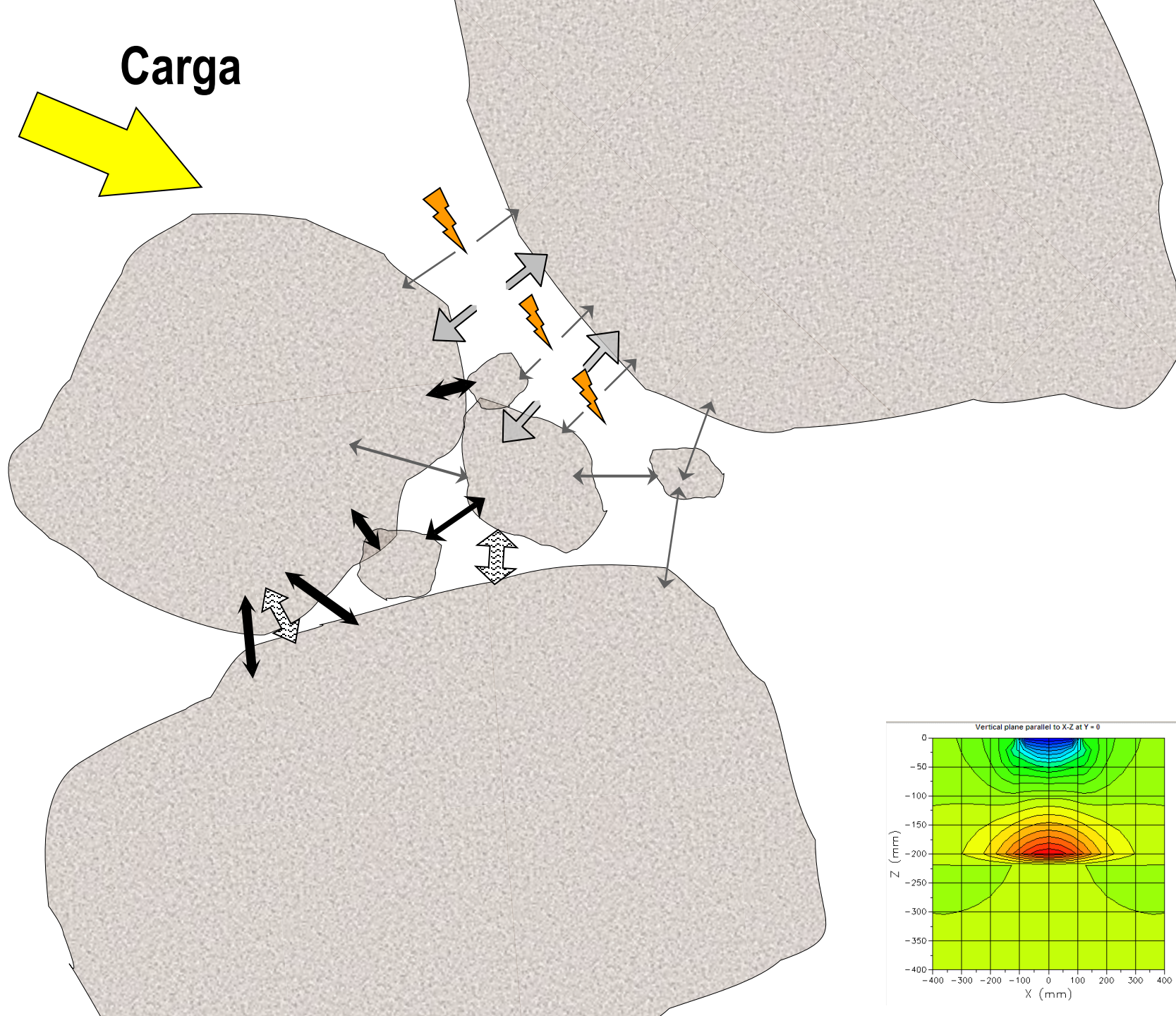
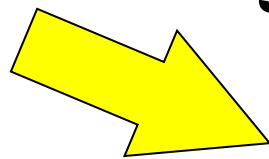
Algunos de los enlaces fallan cuando deformación supera el admisible





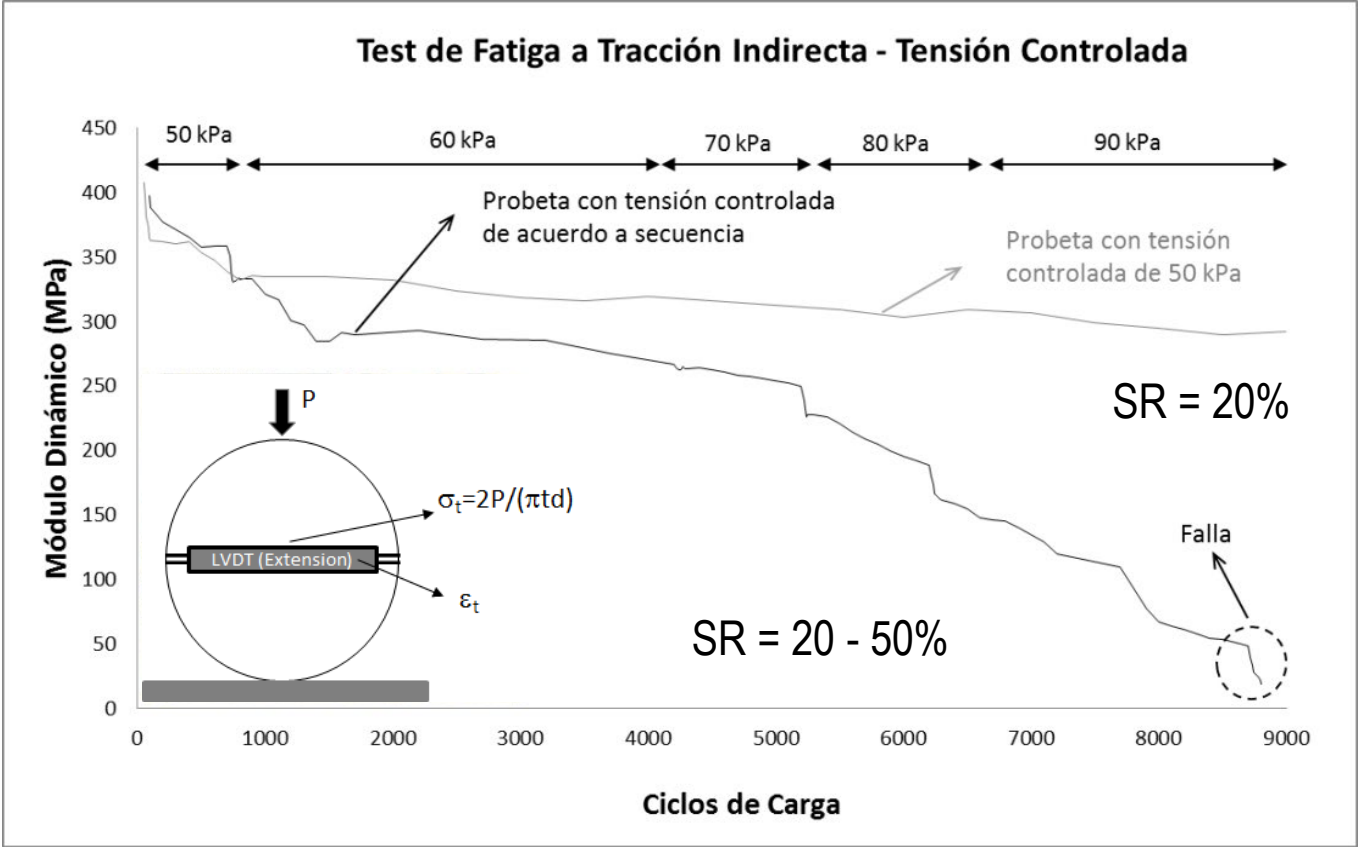


# Carga





# Análisis/Diseño Estructural → Modelo Comportamiento



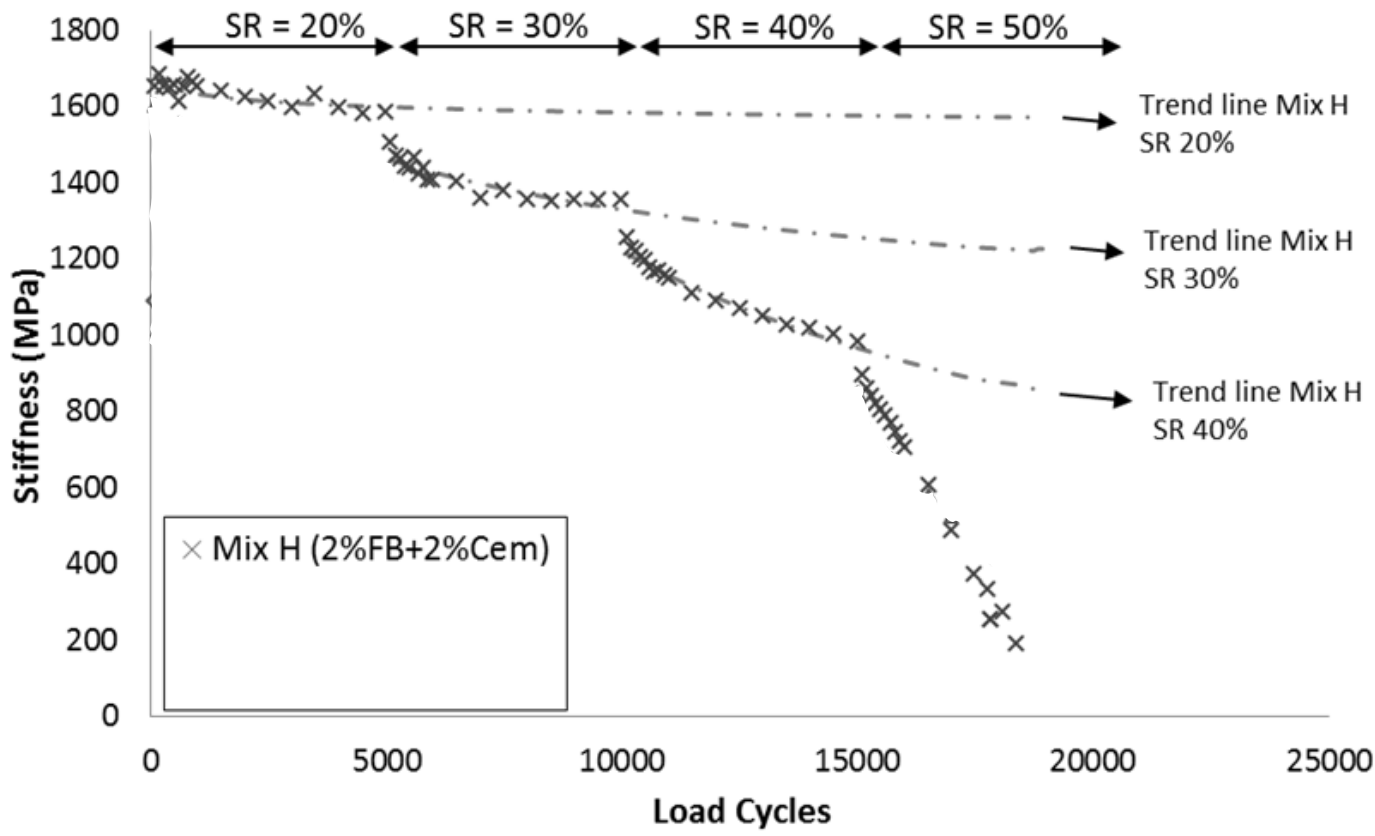
ITFT  
Indirect Tensile Fatigue Test

SR: Stress Ratio → Parámetro que indica “cuan cerca” de las **tensiones/deformaciones máximas admisibles** está trabajando la mezcla →  $[\sigma_{trabajo} / \sigma_{admisible}]$  o  $[\epsilon_{trabajo} / \epsilon_{admisible}]$

Concepto de “Endurance Límit”: (Perpetual Pavements)

# Análisis/Diseño Estructural → Análisis

## Indirect Tensile Fatigue Test - Stress Controlled

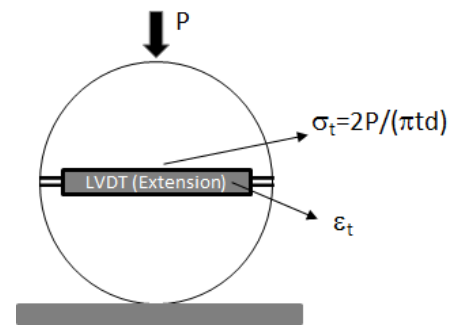


**S.Eq.**  
**Mix H**

SR 20% → 89% S.Ini

SR 30% → 38% S.Ini

SR 40% → 11% S.Ini

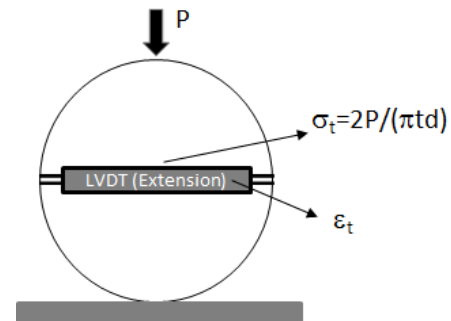
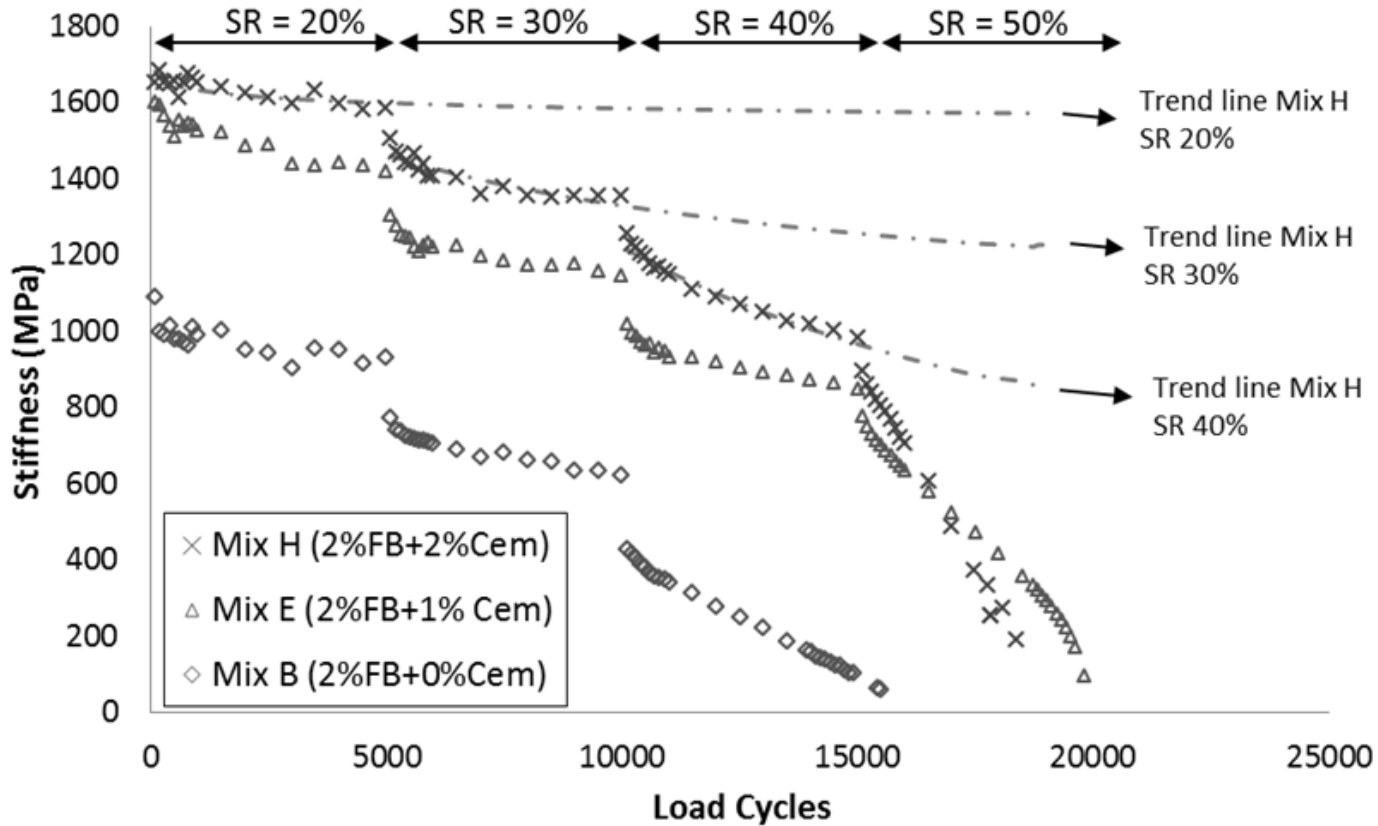


**S.Ini.:** Rigidez Inicial (ensayo ITFT)

**S.Eq.:** Rigidez de Equilibrio (Ensayo ITFT)

# Análisis/Diseño Estructural → Análisis

## Indirect Tensile Fatigue Test - Stress Controlled



**S.Ini.:** Rigidez Inicial (ensayo ITFT)

**S.Eq.:** Rigidez de Equilibrio (Ensayo ITFT)



# Análisis/Diseño Estructural → Ecuación de ajuste

SR (%)	RSIE (%)	
	AE2C1	AE2C2
10	100%	100%
20	76%	89%
25	55%	61%
30	36%	38%
35	22%	22%
40	10%	11%
45	3%	6%
50	0%	0%

$$RSIE = \frac{S.Eq.}{S.Ini}$$

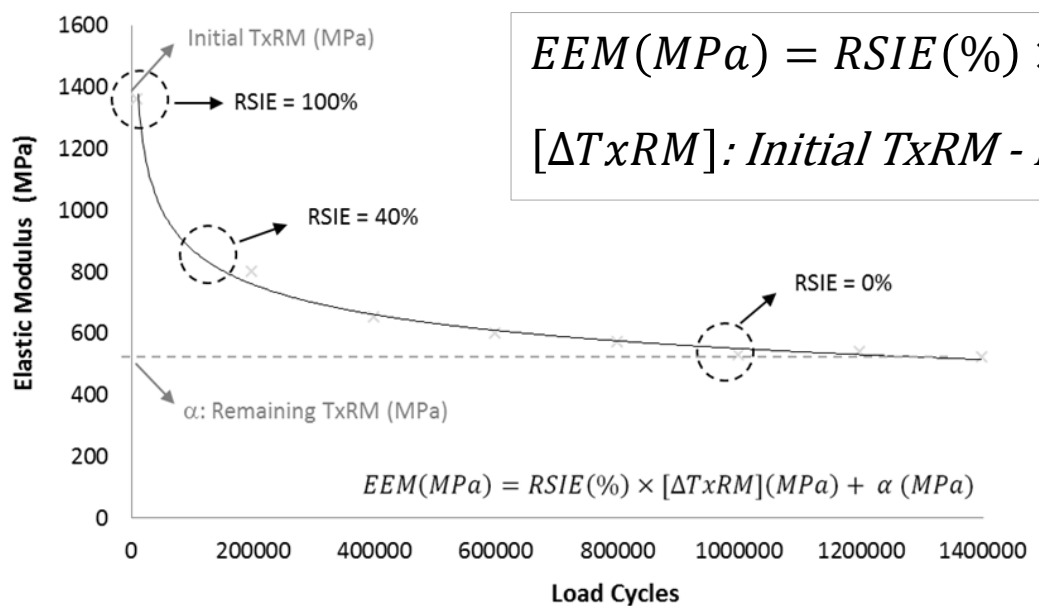
RSIE: Ratio between S.Ini and S.Eq.

S.Eq: Rigidez de Equilibrio (ensayo ITFT)

S.Ini: Rigidez Inicial (ensayo ITFT)



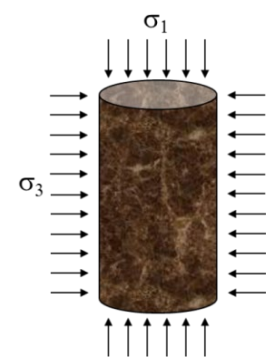
Evolution of the Effective Elastic Modulus (EEM)



$$EEM(MPa) = RSIE(\%) \times [\Delta TxRM](MPa) + \alpha (MPa)$$

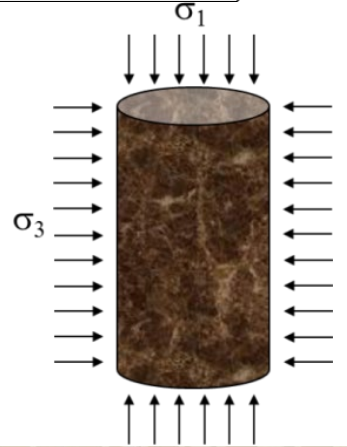
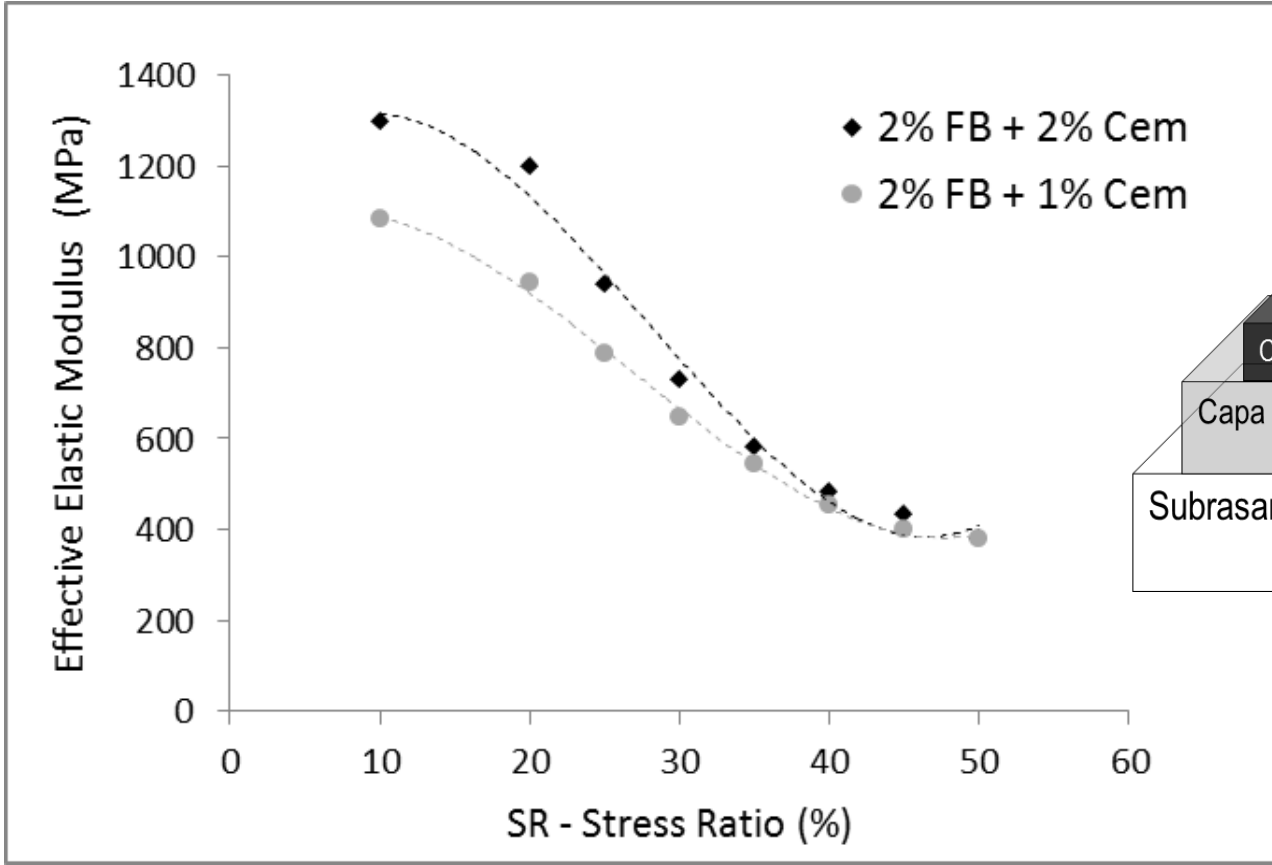
$[\Delta TxRM]$ : Initial TxRM - Remaining TxRM ( $\alpha$ )

$$EEM(MPa) = RSIE(\%) \times [\Delta TxRM](MPa) + \alpha (MPa)$$



# Análisis/Diseño Estructural → Resultado

Método de Módulo Equivalente (MME) → Halles, 2013 (PhD)



**Effective Elastic Modulus (MPa):** Corresponde al Módulo Resiliente Traxial

# Análisis/Diseño Estructural → Caso Práctico MME

## Paso 1: Definición Estructura de Análisis

Capa	Modulus Elástico (MPa)	Espesor (cm)	Contenido Asfalto Espumado	Contenido Cemento
Concreto Asfáltico	4000	5	---	---
Capa Reciclada	800	10 - 15 - 20	2.0%	1.0%
Subbase Granular	180	15	---	---
Subrasante	76	---	---	---

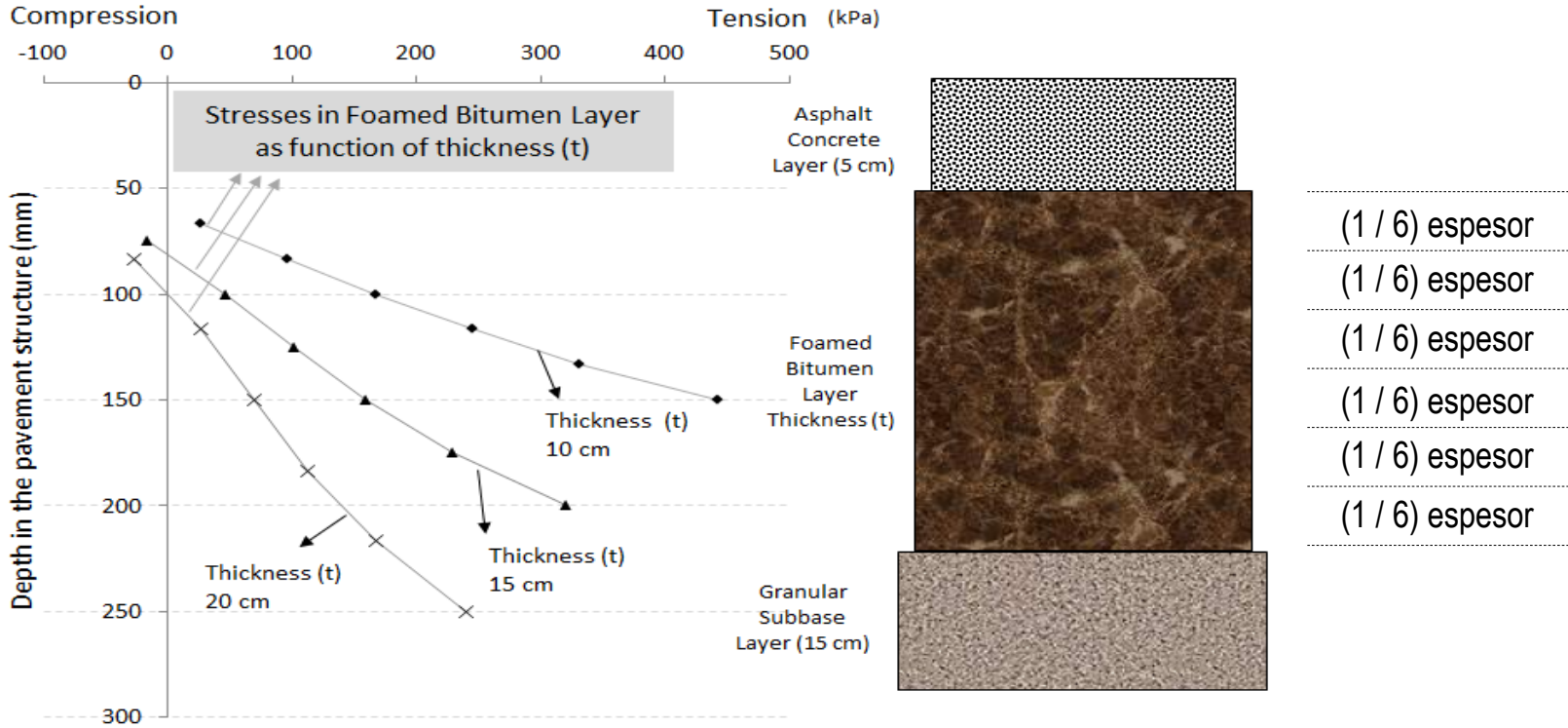
### Notas:

- Módulos de Asfalto, Subbase y Subrasante son datos conocidos, además de espesor de subbase
- Módulo semilla para base reciclado entre 600 y 1000.
- Espesores semilla para base reciclada: 10 – 15 y 20 cm.
- Por definir: Espesor de carpeta asfáltica y base reciclada



# Análisis/Diseño Estructural → Caso Práctico

## Paso 2: Cálculo de Tensiones en Capa Reciclada



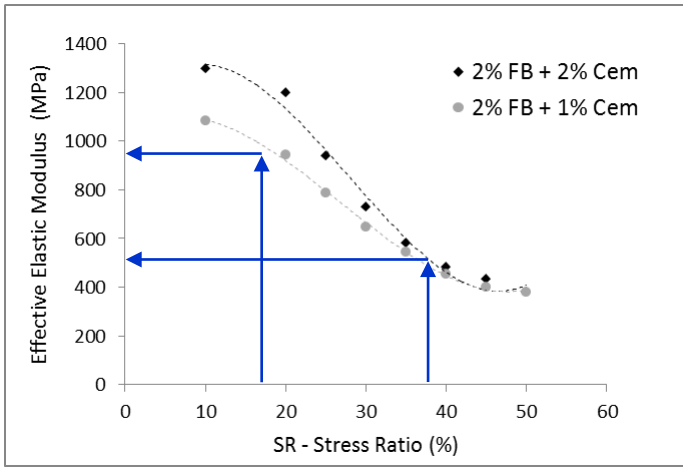
### Notas:

- Capa Reciclada se divide en N subcapas para efectos de estimar tensiones (este caso N=6)
- Para cálculo de tensiones en la estructura usar modelo lineal elástico tradicional (Elsym5 – MePads)

# Análisis/Diseño Estructural → Caso Práctico

## Paso 3:

Estimación Módulo Elástico Equivalente (EMM) para Capa Reciclada con AE



$$SR \rightarrow [\sigma_{\text{trabajo}} / \sigma_{\text{admisible}}]$$

FB Layer Thickness (t)	Fiber of the FB Layer	Stress Ratio (%)	EMM (MPa) 2% FB + 1% Cem	Average EMM (MPa)
10 cm	(1/6) t	<10	1083	614
	(2/6) t	18	964	
	(3/6) t	38	481	
	(4/6) t	> 50	386	
	(5/6) t	> 50	386	
	(6/6) t	> 50	386	
15 cm	(1/6) t	< 10	1083	722
	(2/6) t	< 10	1083	
	(3/6) t	21	896	
	(4/6) t	37	500	
	(5/6) t	> 50	386	
	(6/6) t	> 50	386	
20 cm	(1/6) t	< 10	1083	801
	(2/6) t	< 10	1083	
	(3/6) t	14	1039	
	(4/6) t	26	769	
	(5/6) t	40	446	
	(6/6) t	> 50	386	

# Análisis/Diseño Estructural → Caso Práctico

## Paso 4: Estimación Vida Util Carpeta Asfáltica

Capa	Espesor de cada Capa (cm)		
	Estructura 1	Estructura 2	Estructura 3
Concreto Asfáltico	5,0	5,0	5,0
Capa Reciclada	10	15	20
Subbase Granular	15	15	15
Vida Util Carpeta Asfáltica (Ejes Eq.)	1,42E+06	5,38E+06	11,6E+06
Módulo Capa Reciclada (Mpa)	614	722	801



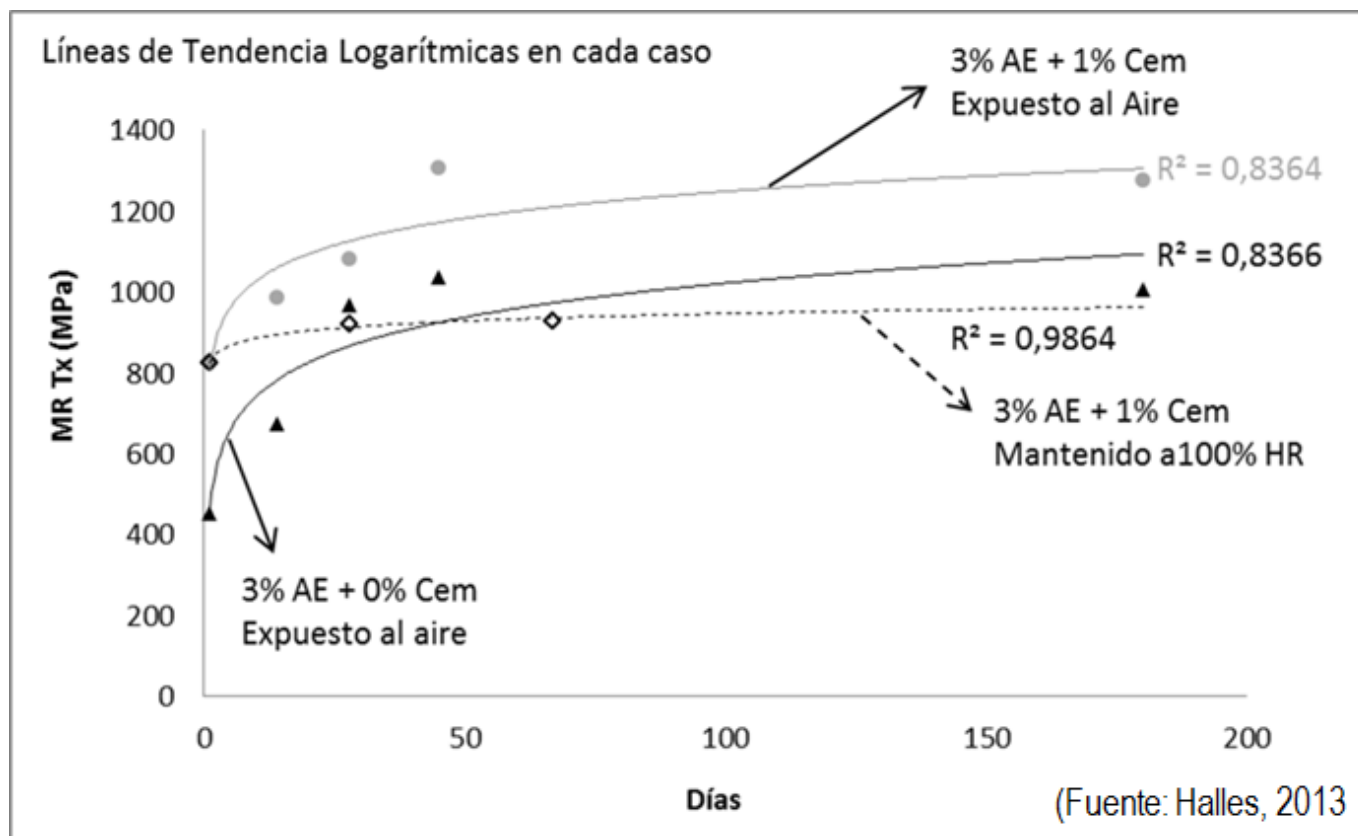
# Principales Conclusiones

1. El uso de tecnologías de reciclado NO van Resolver los Problemas de Ingeniería de Caminos



# Principales Conclusiones

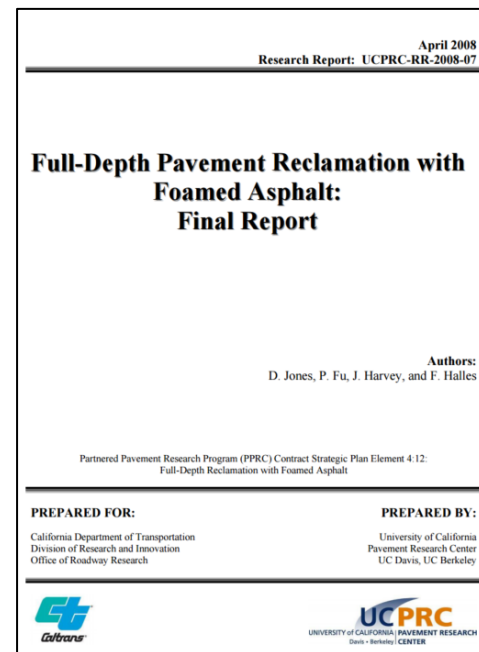
2. Tener conciencia del Rol que juega el Cemento y del Proceso de Curado que requieren este tipo de mezclas



# Principales Conclusiones

3. No descuidar nunca el impacto que tienen las variables que no podemos controlar : humedad y temperatura ambiente; humedad y temperatura de los áridos recuperados → Planificar el proyecto de tal forma de no construir a fines de otoño ni en invierno
4. Realizar un análisis estructural considerando parámetros mecánicos de estas mezclas en el corto plazo y definir a priori si es o no posible abrir al tránsito luego de la construcción.
5. Si MR Subrasante menor a 100 Mpa → Mejorar subrasante antes de realizar reciclado.  
Razón: Stress Ratio Capa reciclada es muy alto.

Referencia: Jones, D., Fu P., Harvey J.T. and Halles F. (2008).  
[Full-Depth Reclamation With Foamed Asphalt: Final Report.](#)  
[Research Report UCPRC-RR-2008-07,](#)  
University of California Pavement Research Center.





---

# GRACIAS



---

Contacto:  
Felipe Halles.  
[fhalles@tspchile.cl](mailto:fhalles@tspchile.cl);  
[www.tspchile.cl](http://www.tspchile.cl)  
**GRUPO ALTA VIA**

**TSP**  
Ingeniería de Caminos