



Mejoras prestacionales en pavimentos rígidos elaborados con agregados de hormigón reciclado

Edgardo Becker

Ingeniero en Construcciones UNCPBA

Gerente de Desarrollo y Servicios Técnicos de LOMA NEGRA

Argentina

Septiembre de 2021



Índice / Temario

Mejoras prestacionales en pavimentos rígidos
elaborados con agregados de hormigón reciclado

Ing. Edgardo Becker

■ Introducción

- Evolución de resistencia
- Evolución de tensiones inducidas
- Tensiones y deformaciones en pavimentos de hormigón

■ Beneficios del uso de AG reciclados

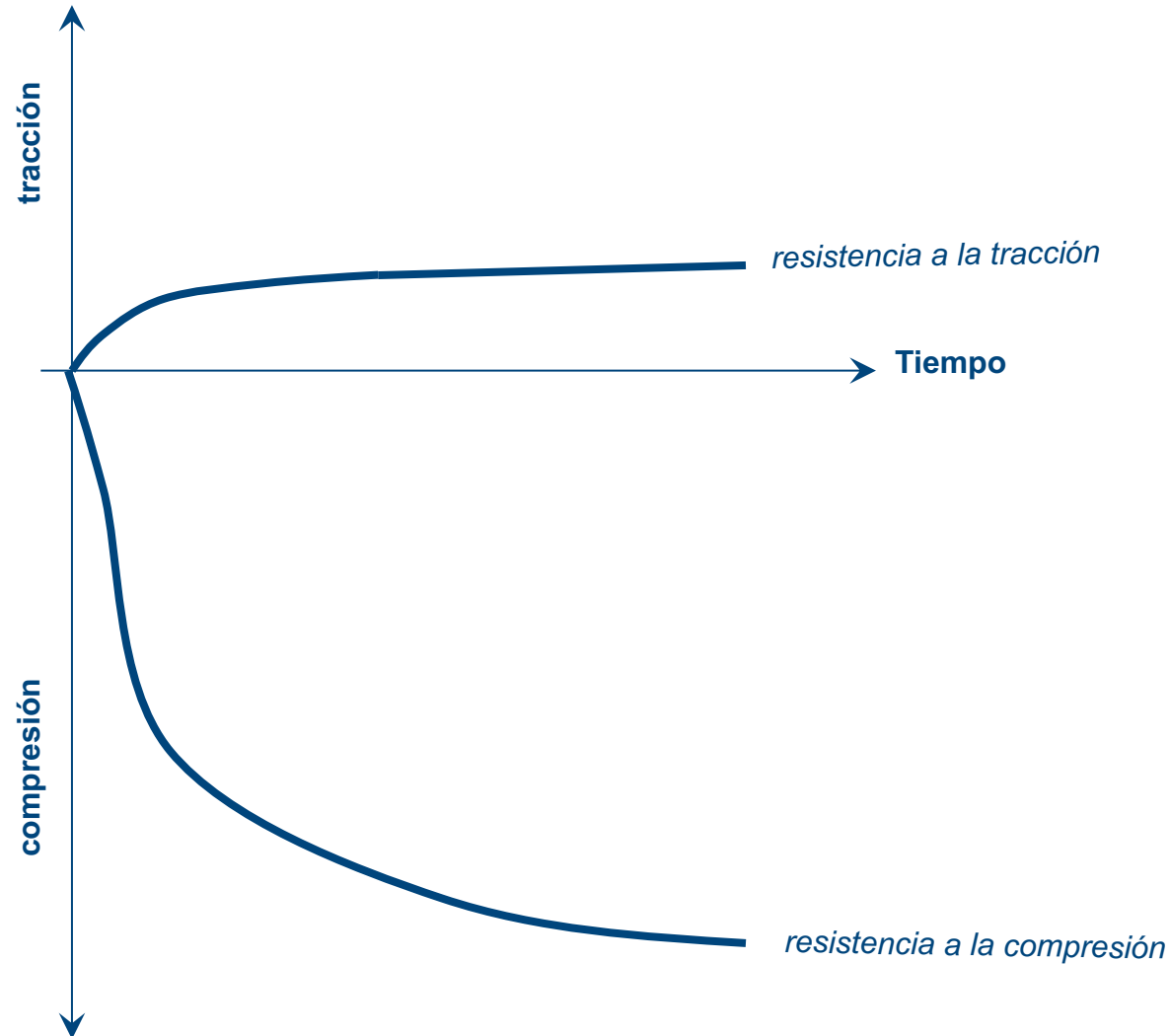
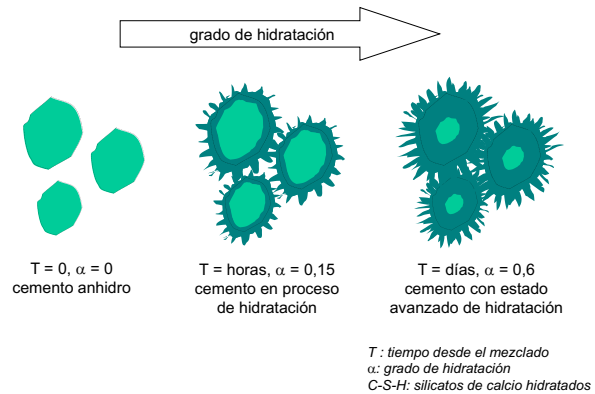
- Beneficios técnicos/prestacionales
- Otros beneficios asociados a la sustentabilidad

■ Conclusiones



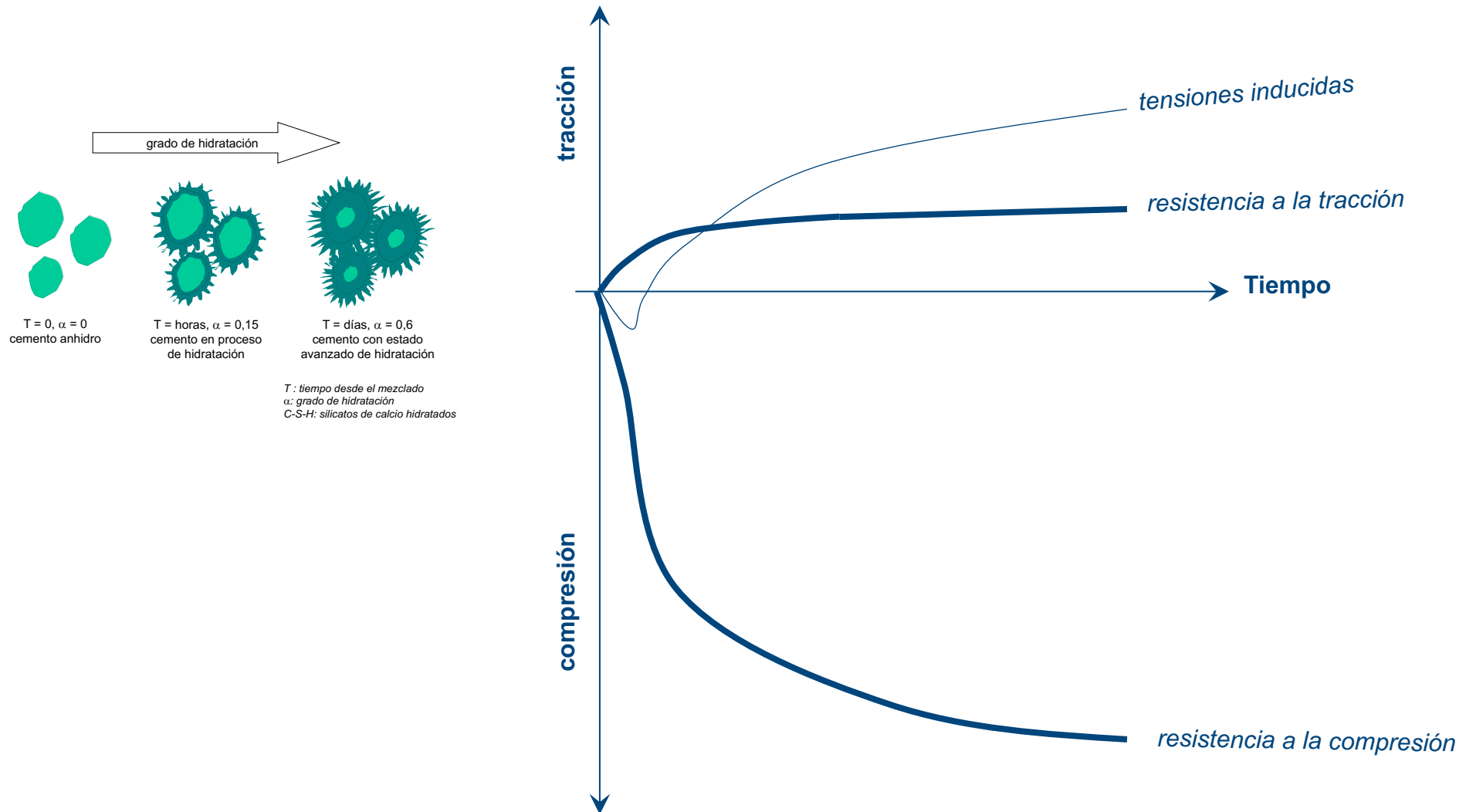
Evolución de resistencia

resistencia a tracción y a compresión del hormigón



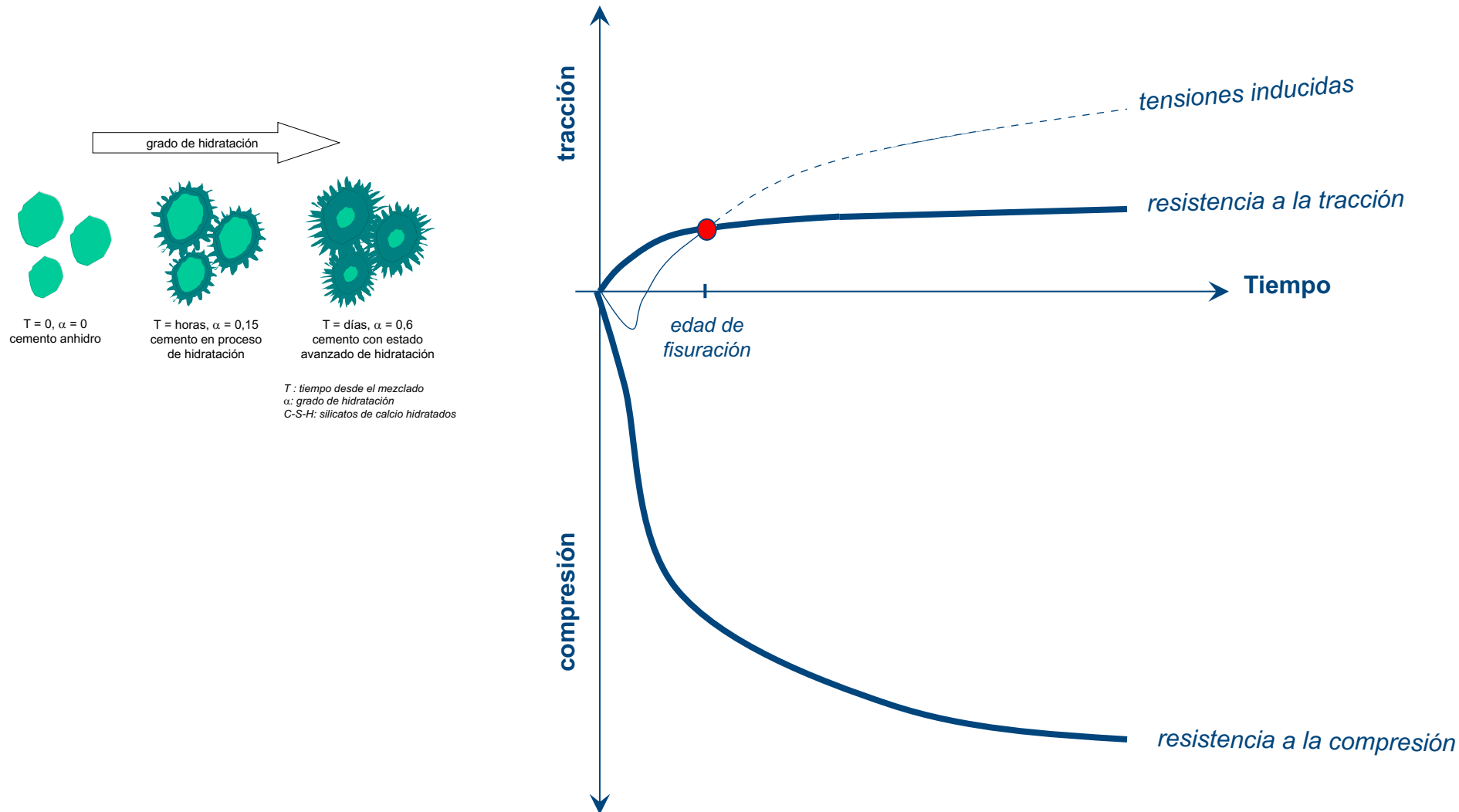
Evolución de tensiones inducidas y resistencia

Determinación del tiempo de fisuración



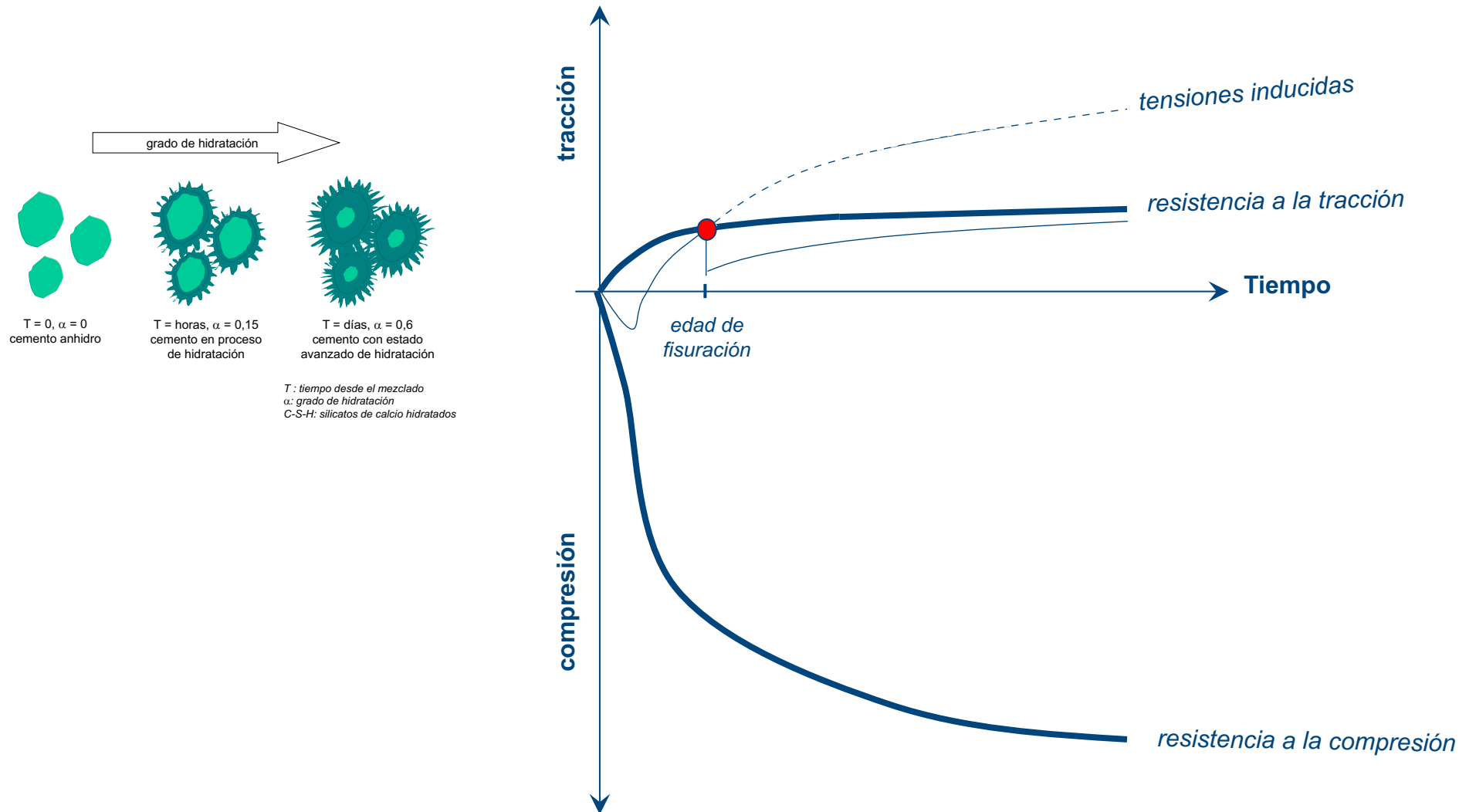
Evolución de tensiones inducidas y resistencia

Determinación del tiempo de fisuración



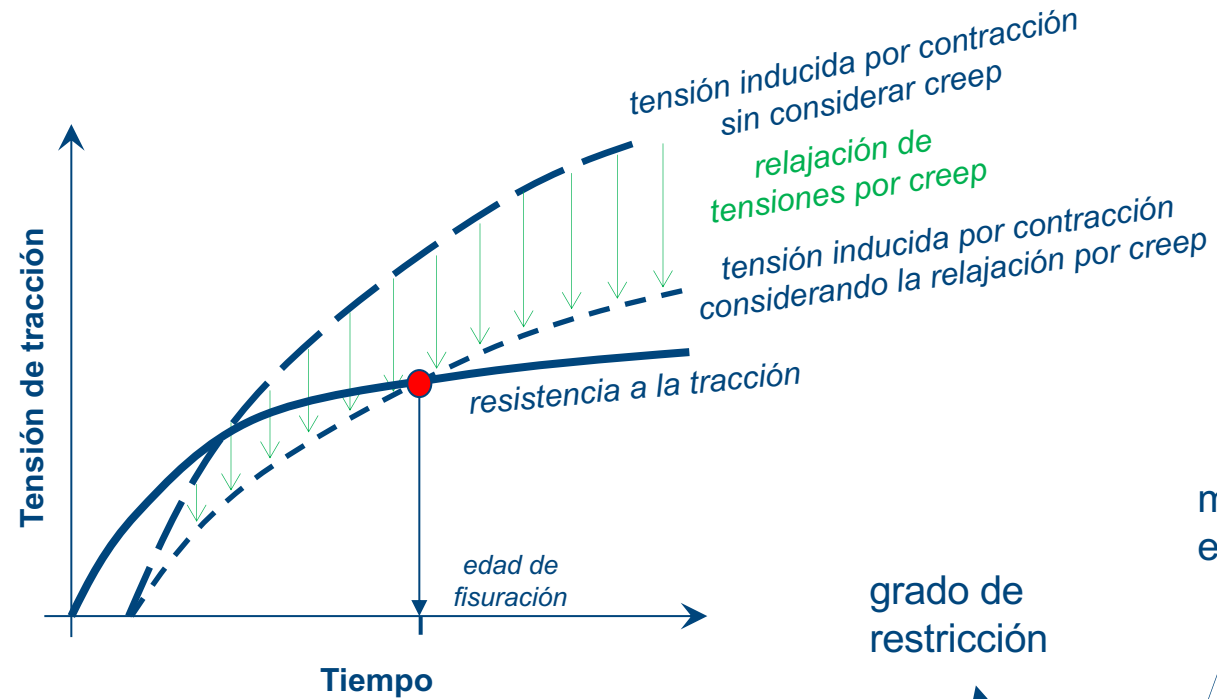
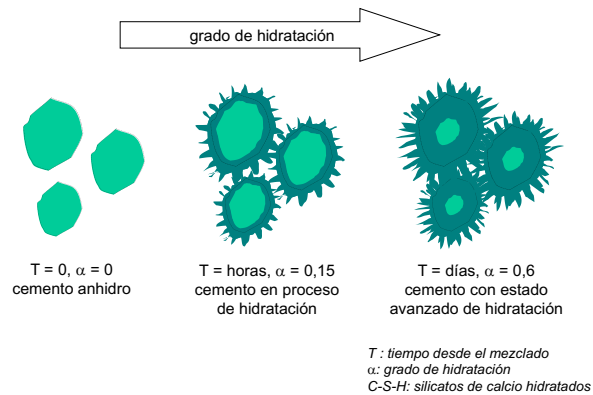
Evolución de tensiones inducidas y resistencia

Determinación del tiempo de fisuración



Evolución de tensiones inducidas y resistencia

Determinación del tiempo de fisuración



$$\sigma_{\text{inducida}} = \psi(\mu, h, x) \cdot \frac{E_c(t) \cdot \epsilon(t)}{1 + \phi(t)}$$

grado de restricción

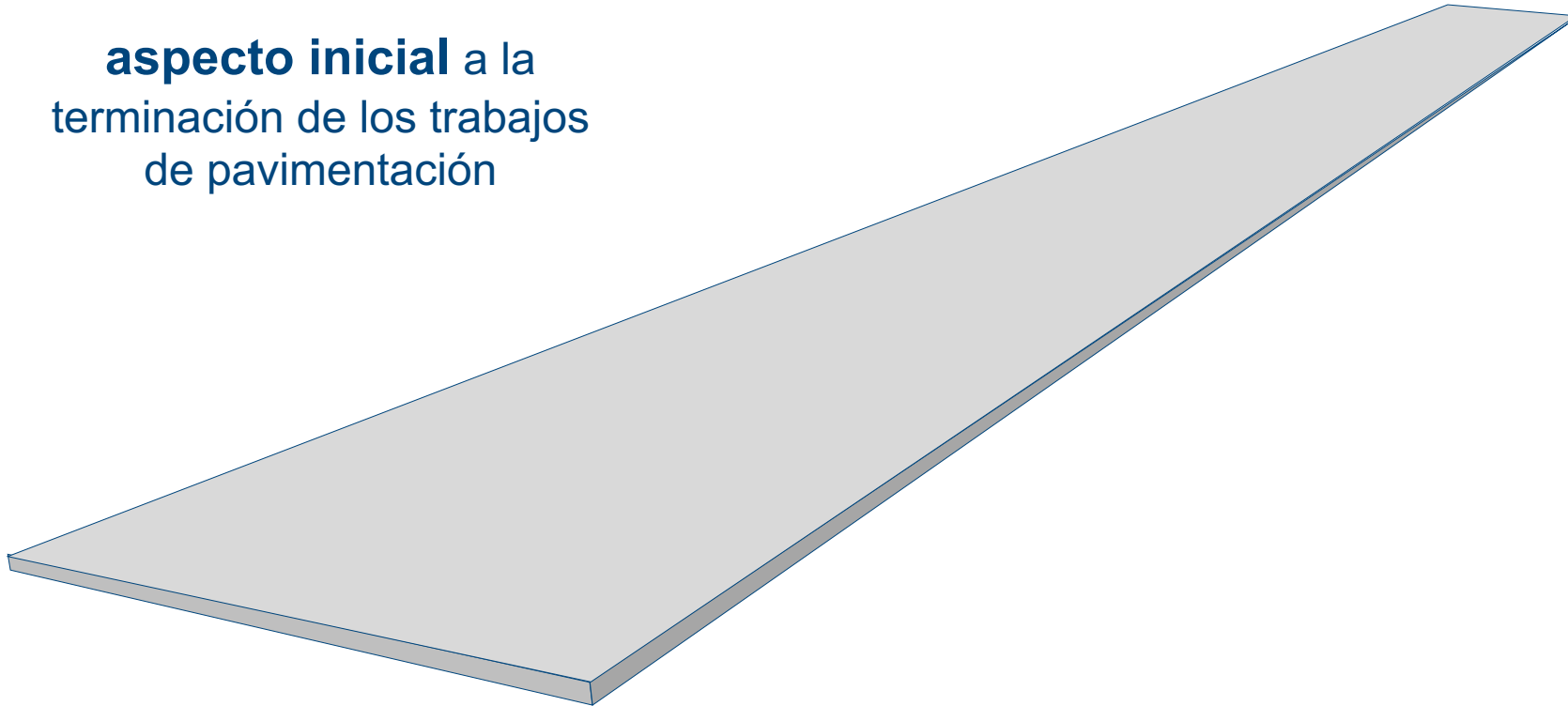
módulo de elasticidad

deformación específica

coeficiente de creep

Control de fisuración en pavimentos JPCP (jointed-plain concrete pavement)

aspecto inicial a la
terminación de los trabajos
de pavimentación

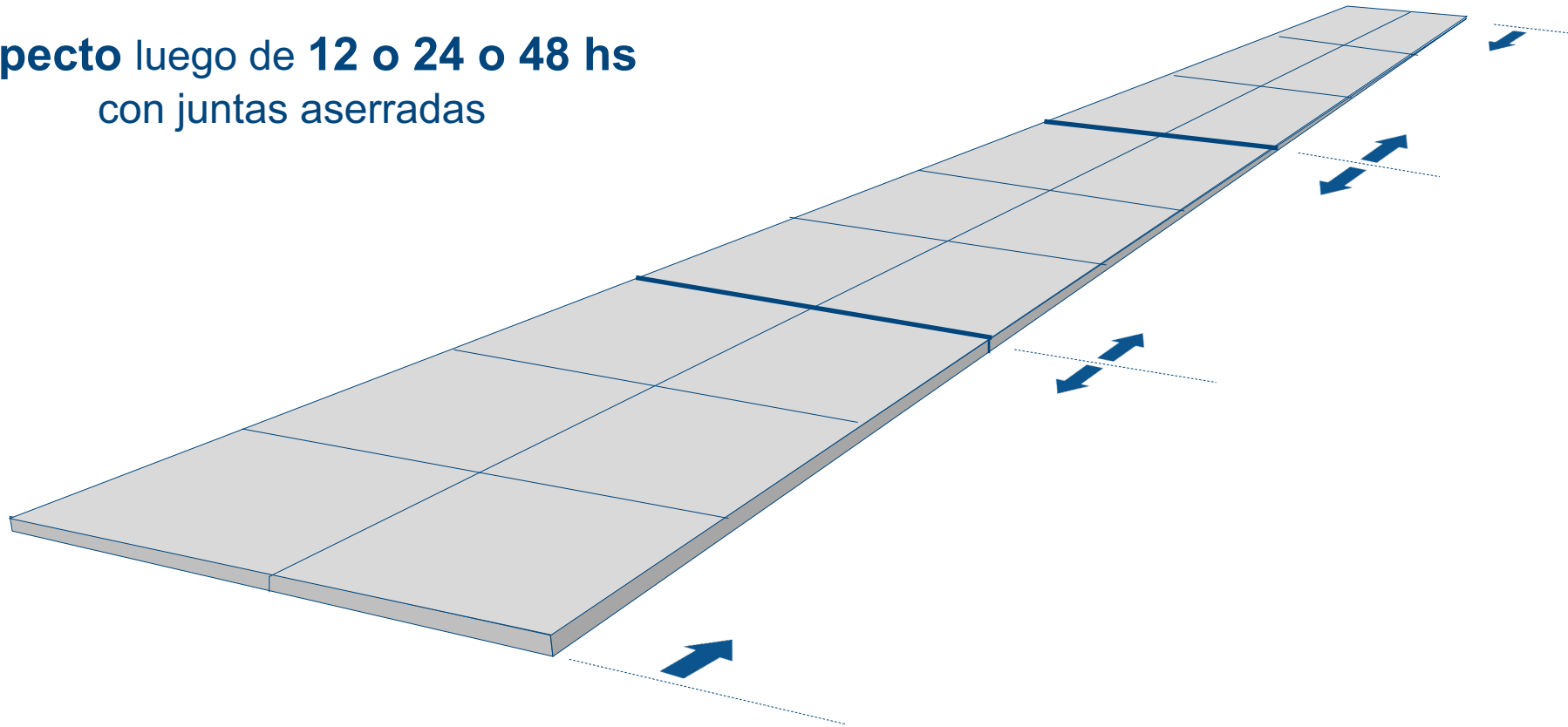


Fuente: E. Becker, 2015. Presentación sobre “Variables que Inciden en el Desempeño de un Pavimento de Hormigón”.
6º Congreso Iberoamericano de Pavimentos de Hormigón.

World Road Association • Association mondiale de la Route • Asociación Mundial de la Carretera • www.piarc.org

Control de fisuración en pavimentos JPCP (jointed-plain concrete pavement)

aspecto luego de **12 o 24 o 48 hs**
con juntas aserradas

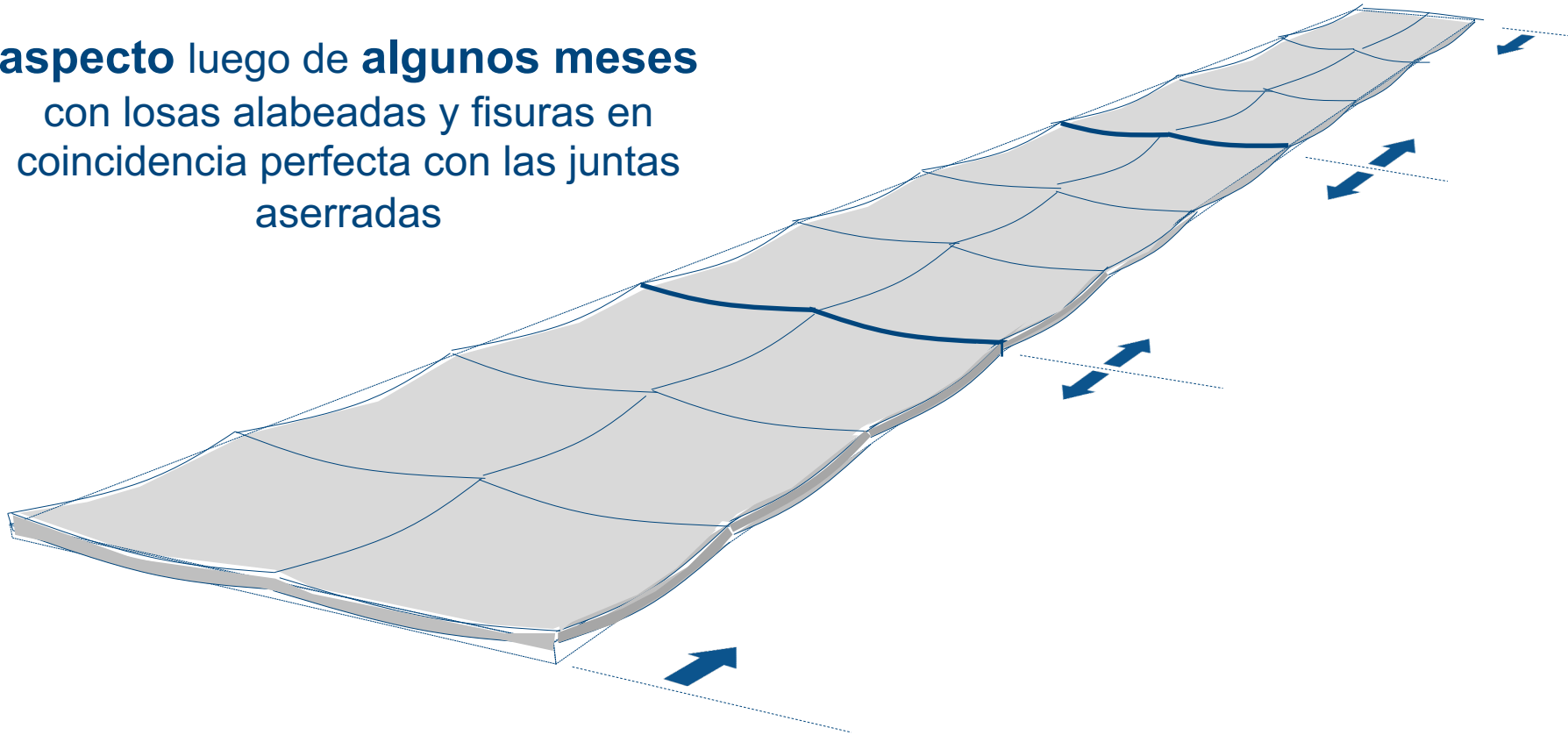


Fuente: E. Becker, 2015. Presentación sobre “Variables que Inciden en el Desempeño de un Pavimento de Hormigón”.
6° Congreso Iberoamericano de Pavimentos de Hormigón.

World Road Association • Association mondiale de la Route • Asociación Mundial de la Carretera • www.piarc.org

Control de fisuración en pavimentos JPCP (jointed-plain concrete pavement)

aspecto luego de **algunos meses**
con losas alabeadas y fisuras en
coincidencia perfecta con las juntas
aserradas

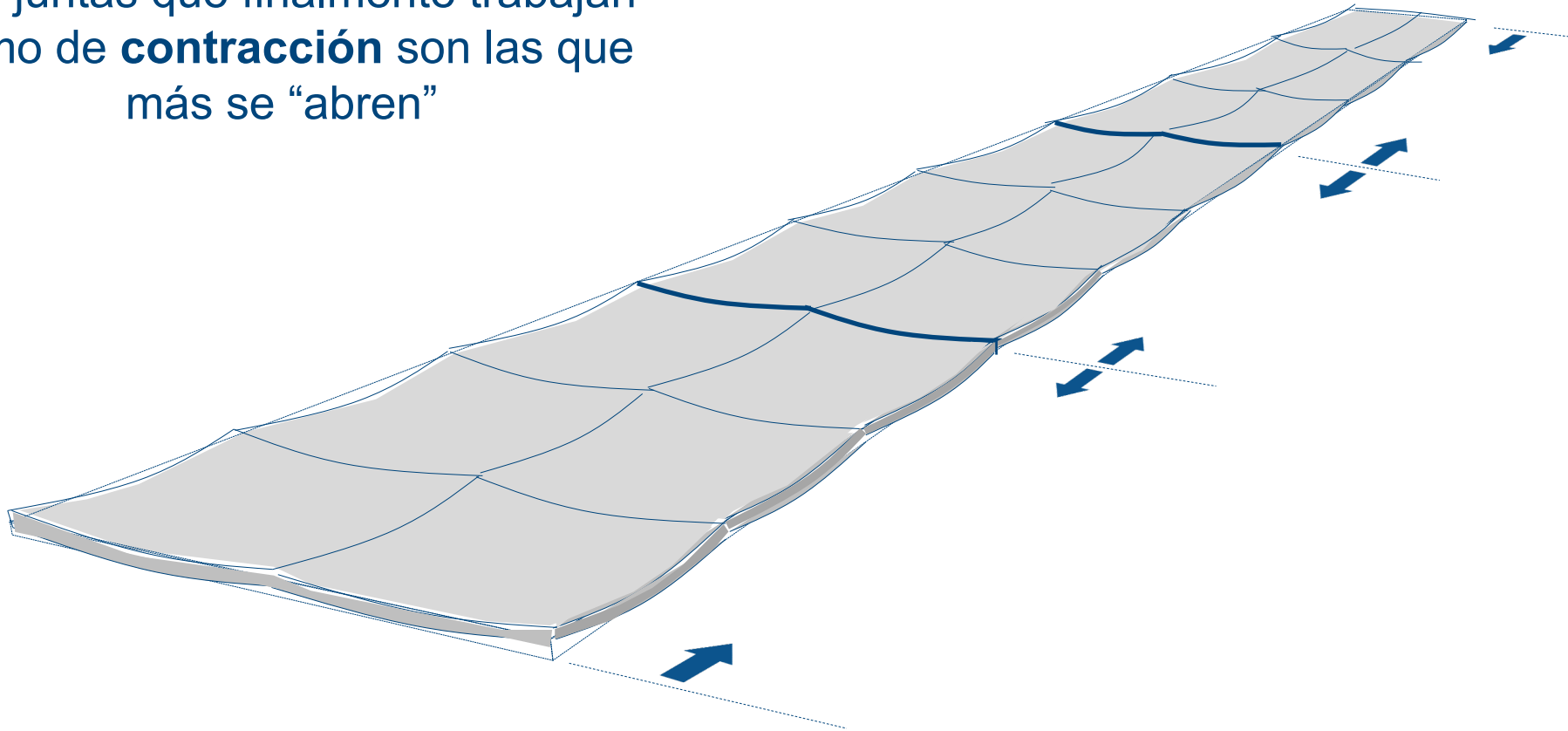


Fuente: E. Becker, 2015. Presentación sobre “Variables que Inciden en el Desempeño de un Pavimento de Hormigón”.
6° Congreso Iberoamericano de Pavimentos de Hormigón.

World Road Association • Association mondiale de la Route • Asociación Mundial de la Carretera • www.piarc.org

Control de fisuración en pavimentos JPCP (jointed-plain concrete pavement)

Las juntas que finalmente trabajan como de **contracción** son las que más se “abren”



Fuente: E. Becker, 2015. Presentación sobre “Variables que Inciden en el Desempeño de un Pavimento de Hormigón”.
6º Congreso Iberoamericano de Pavimentos de Hormigón.

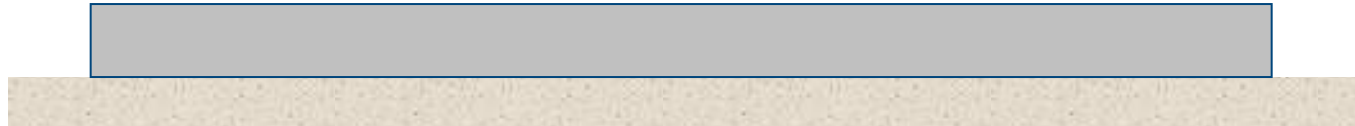
World Road Association • Association mondiale de la Route • Asociación Mundial de la Carretera • www.piarc.org

EFECTO DE LA CONTRACCIÓN

Influencia de la Contracción

contracción autógena (hidratación) + contracción por secado
(evaporación) + "enfriamiento" (térmico)

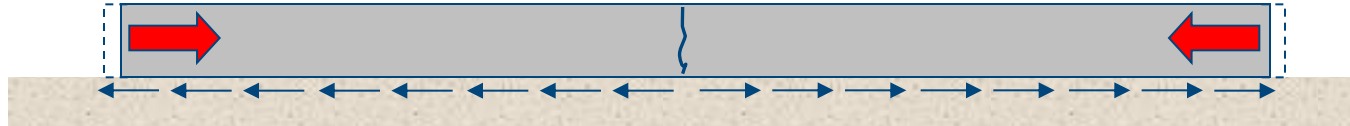
Estado inicial



Influencia de la Contracción

contracción autógena (hidratación) + contracción por secado (evaporación) +
"enfriamiento" (térmico)

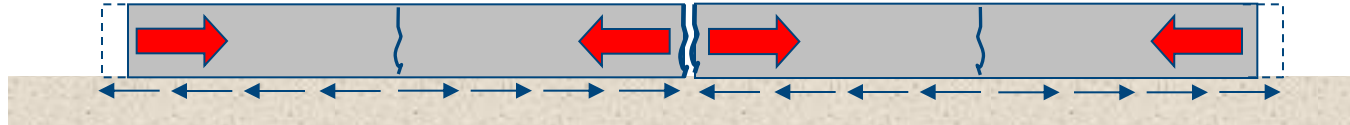
Luego de algunas horas (pueden ser pocas o unas cuantas dependiendo del caso)



Influencia de la Contracción

contracción autógena (hidratación) + contracción por secado
(evaporación) + "enfriamiento" (térmico)

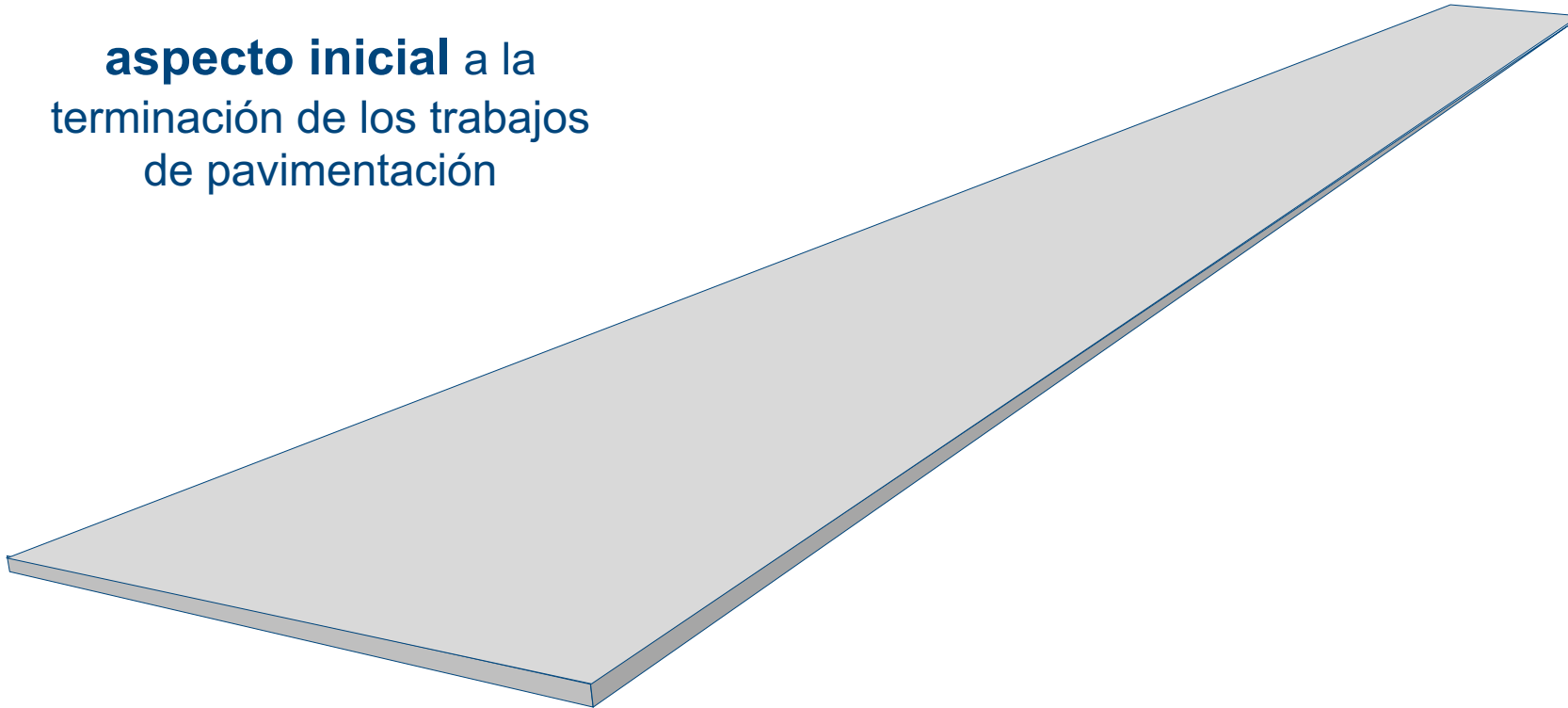
Luego de unos días o semanas (dependiendo del caso)



**restricción
a la
contracción**

Poniéndole un poco de ingeniería...

aspecto inicial a la
terminación de los trabajos
de pavimentación

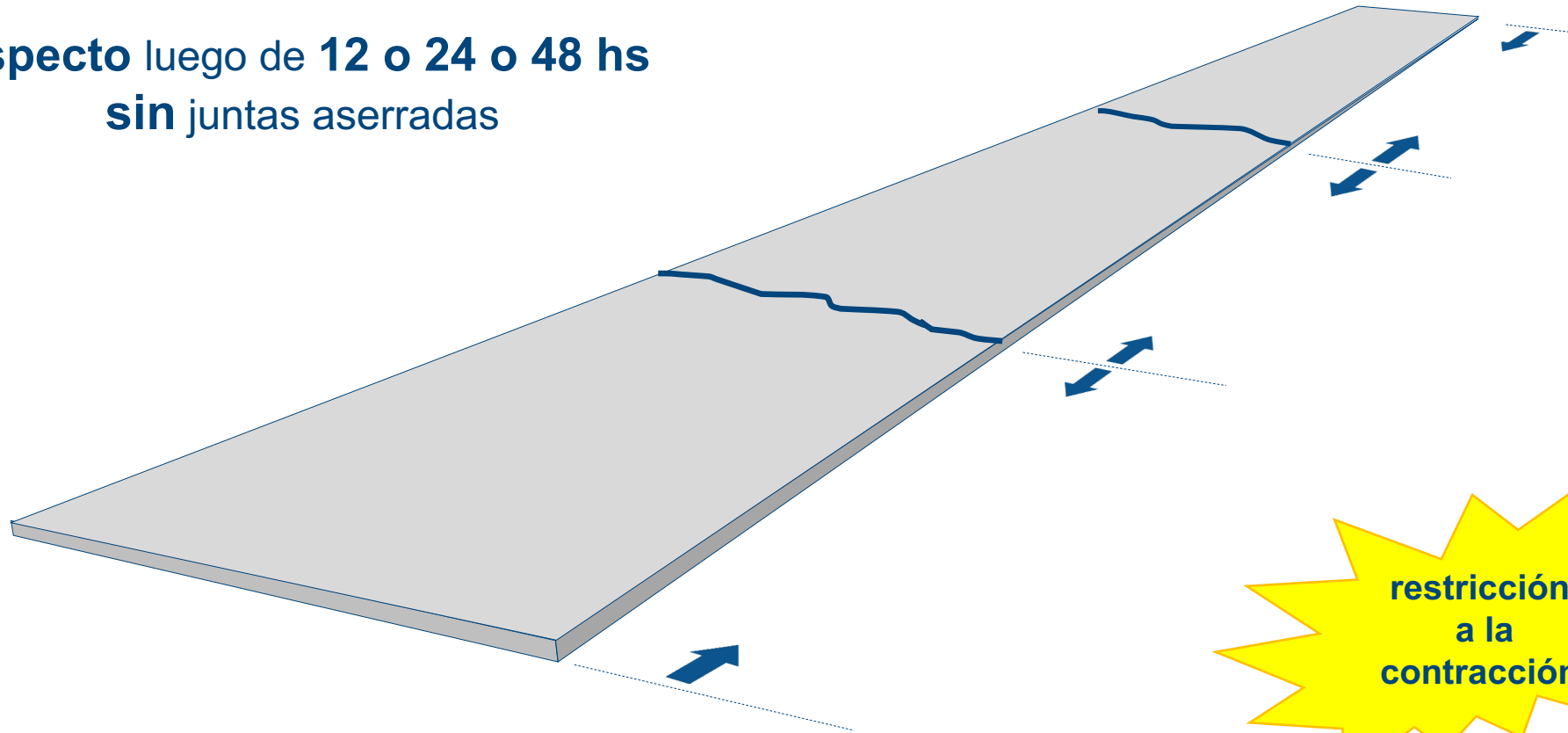


Fuente: E. Becker, 2015. Presentación sobre “Variables que Inciden en el Desempeño de un Pavimento de Hormigón”.
6° Congreso Iberoamericano de Pavimentos de Hormigón.

Poniéndole un poco de ingeniería...

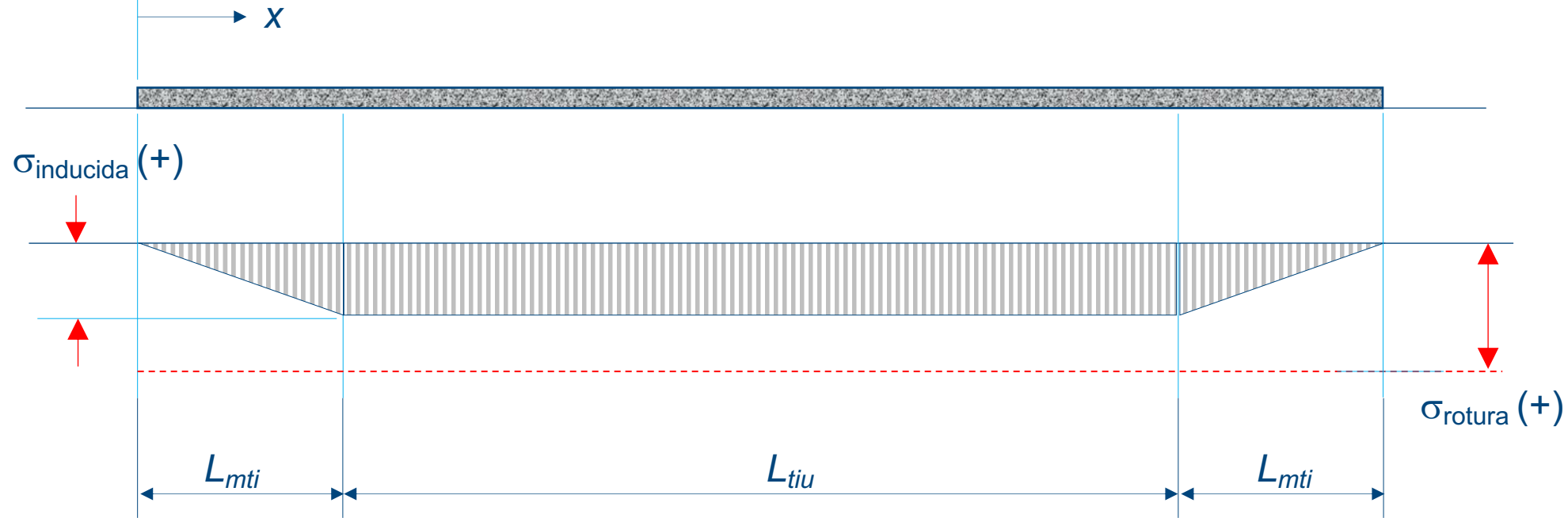
¿Qué pasa si nos demoramos en aserrar las juntas?

aspecto luego de 12 o 24 o 48 hs
sin juntas aserradas



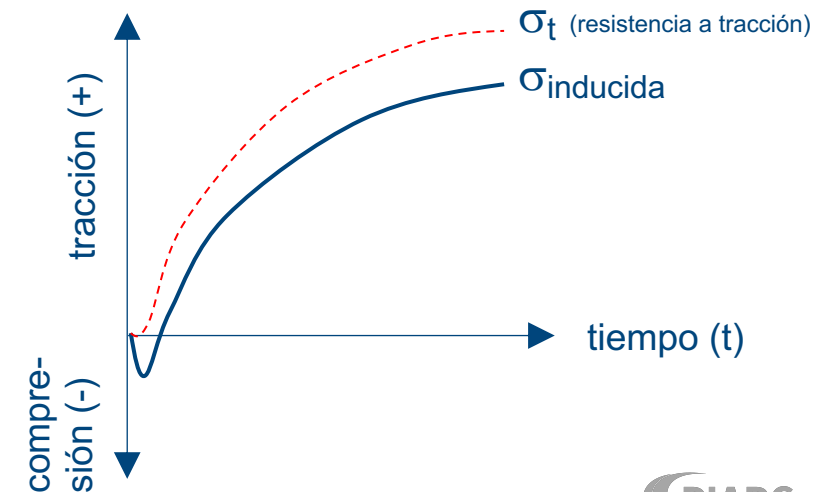
restricción
a la
contracción

Poniéndole un poco de ingeniería...

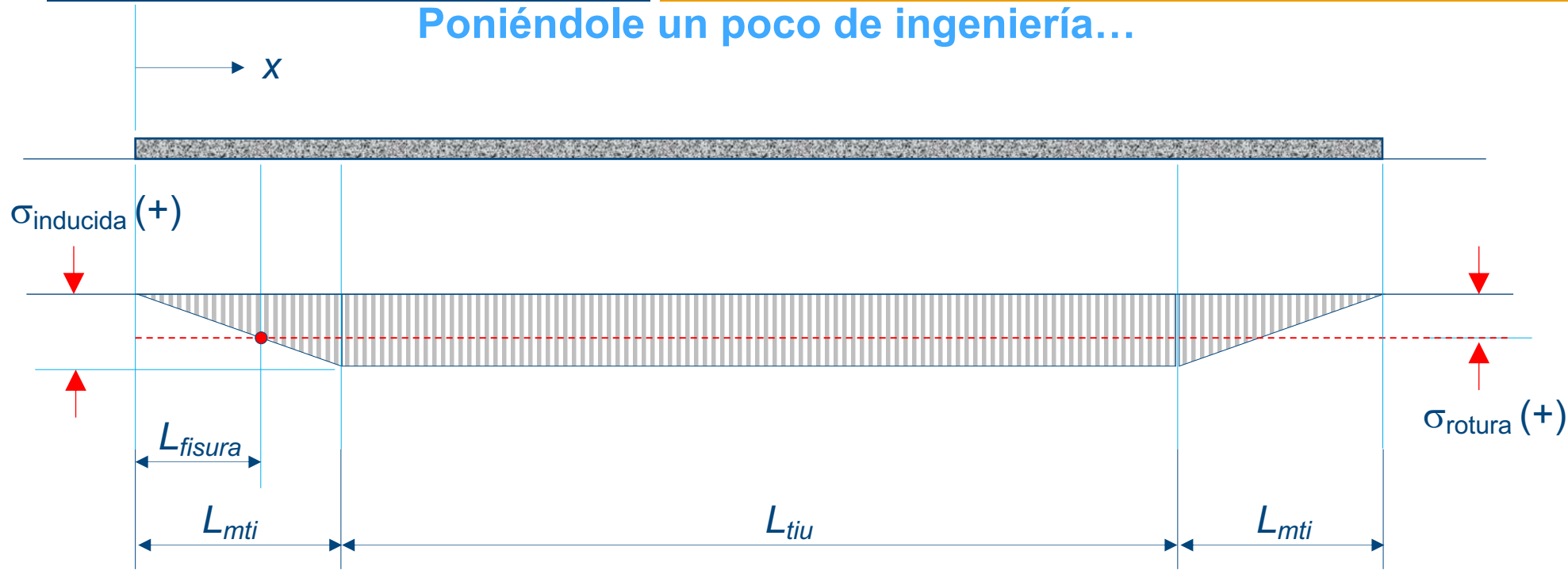


L_{tiu} : longitud de tensión inducida uniforme (máxima potencial)

L_{mti} : distancia hasta la máxima tensión inducida (potencial)



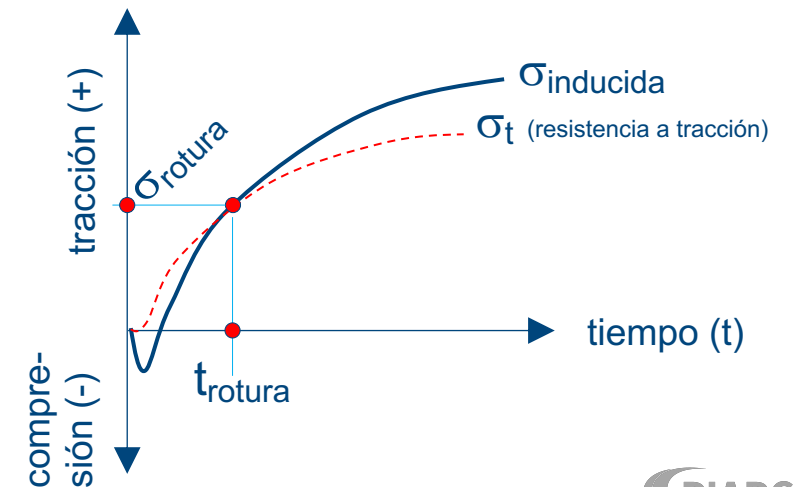
Poniéndole un poco de ingeniería...

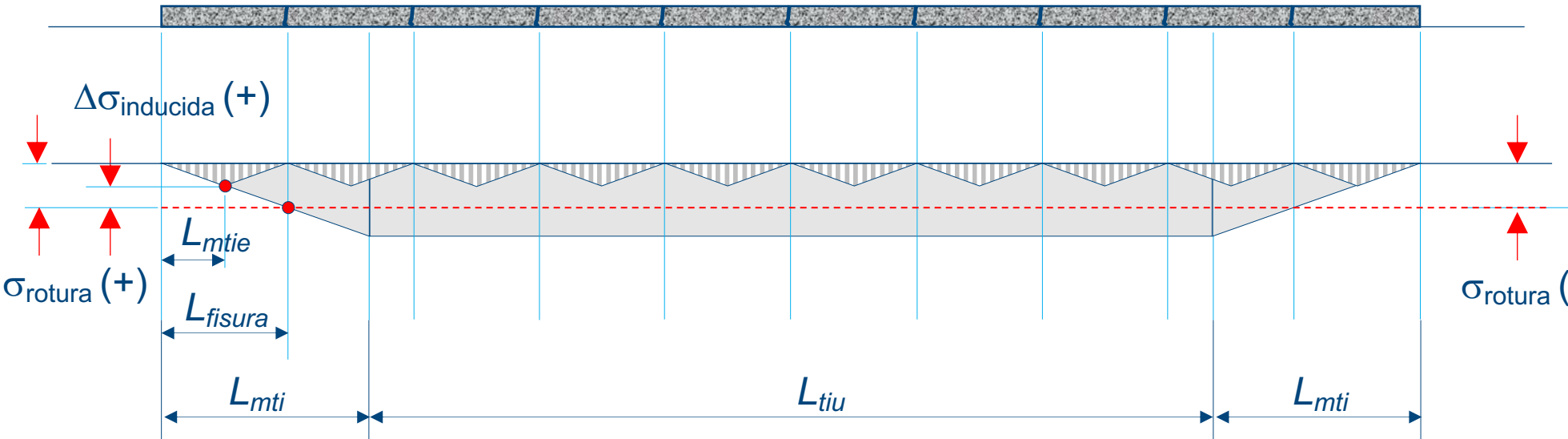


L_{tiu} : longitud de tensión inducida uniforme (máxima potencial)

L_{mti} : distancia hasta la máxima tensión inducida (potencial)

L_{fisura} : distancia hasta la fisura





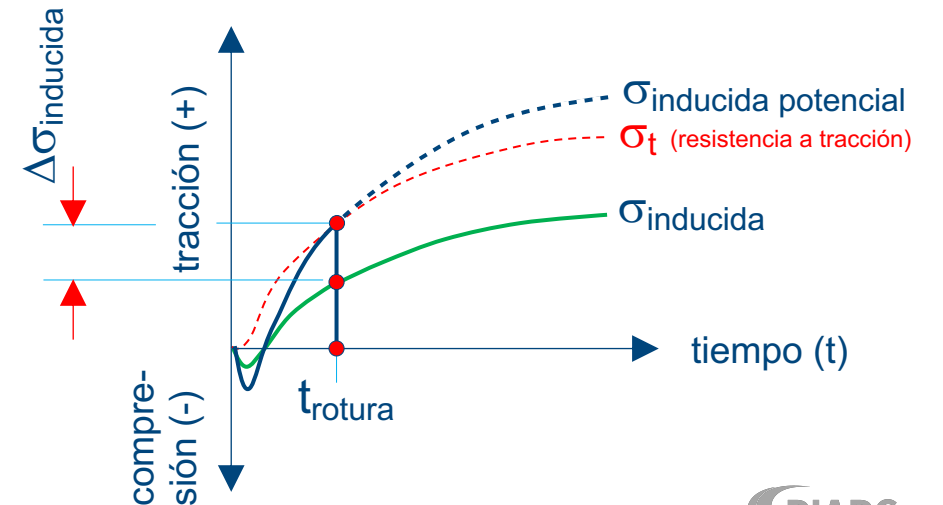
L_{tiu} : longitud de tensión inducida uniforme (máxima potencial)

L_{mti} : distancia hasta la máxima tensión inducida (potencial)

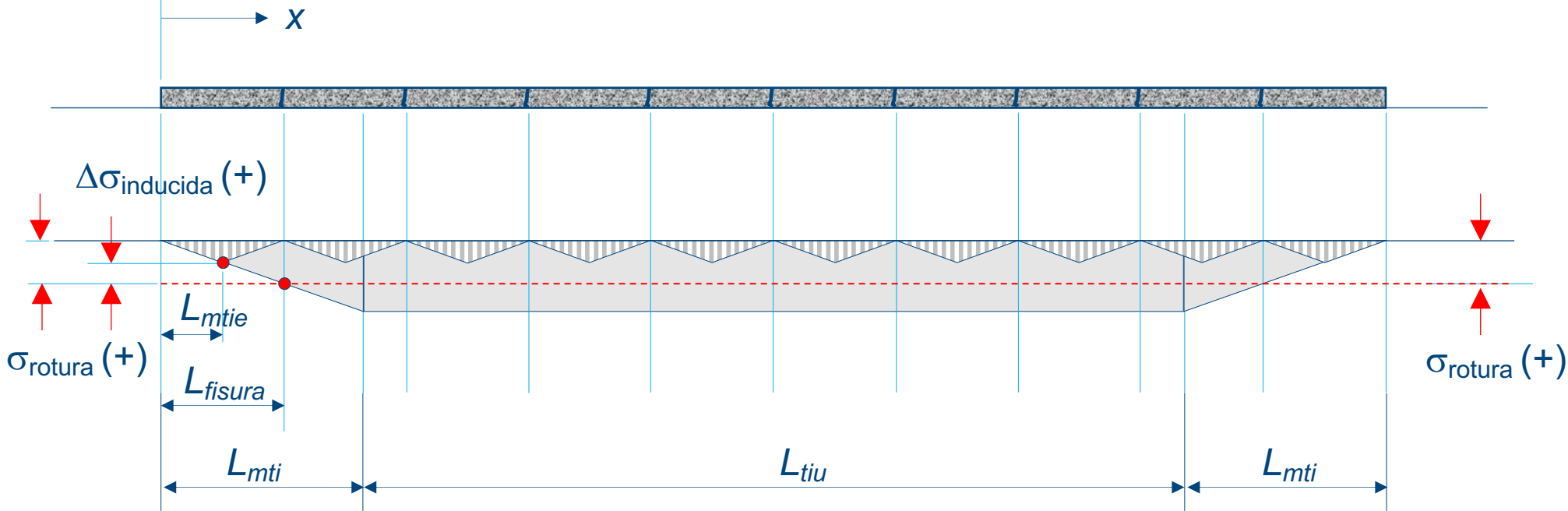
L_{fisura} : distancia hasta la fisura

L_{mtie} : distancia hasta la máxima tensión inducida de equilibrio (post-fisuración)

$$\rightarrow L_{mtie} = \frac{L_{fisura}}{2}$$



Poniéndole un poco de ingeniería...



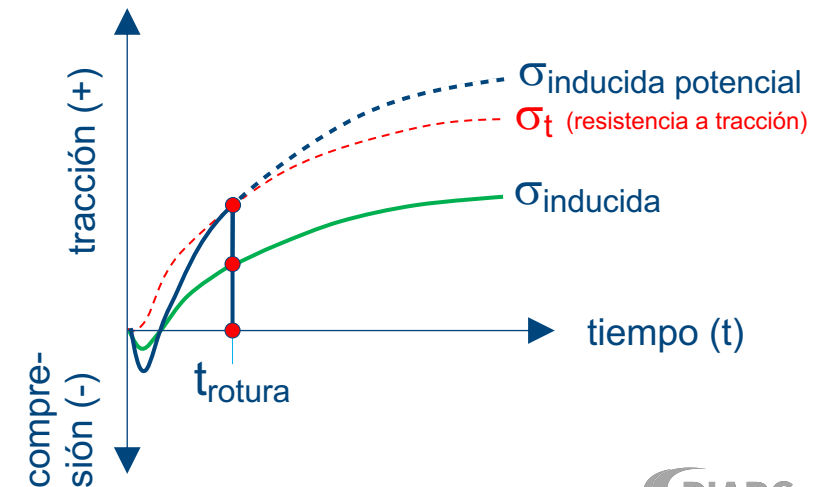
$$\sigma_{inducida} = \psi(\mu, h, x) \cdot \frac{E_c(t) \cdot \epsilon(t)}{1 + \phi(t)}$$

$\psi(\mu, h, x)$: coeficiente de restricción (depende de la relación x/h y μ) $\rightarrow 0,0 < \psi(h, x) < 1,00$

$E_c(t)$: módulo de elasticidad (evoluciona con el tiempo y depende del diseño de la mezcla)

$\epsilon(t)$: deformación específica (evoluciona con el tiempo y depende de la evolución de temperatura y humedad además de la hidratación)

$\phi(t)$: coeficiente de creep (evoluciona con el tiempo y depende del diseño de la mezcla)



¿Qué beneficios técnicos tendría el uso de
AGREGADOS GRUESOS RECICLADOS
obtenidos a partir de la trituración de
hormigón "viejo"?

Tabla 5. Características de los hormigones estudiados

Identificación	CUMC ₃ [kg/m ³]	Contenido de Agua [lts/m ³]	Agregado Grueso	Agregado Fino [%]	Dosis Aditivos [%CUMC]	w/c	f' _{cm} (28 días)	MR (28 días)	$k = \frac{MR}{\sqrt{f'_{cm}}}$
REF-300	300	162	100% AN	45%	No utilizado	0,54	30,0 MPa	4,5 MPa	0,82
REF-350	350	167		42%	No utilizado	0,48	36,9 MPa	5,1 MPa	0,84
REF-400	400	148		40%	0,20% (SF)	0,37	61,4 MPa	6,9 MPa	0,88
R1-300	300	172	100% AR1	45%	No utilizado	0,57	29,3 MPa	3,9 MPa	0,72
R1-350	350	171		42%	No utilizado	0,49	35,5 MPa	4,7 MPa	0,79
R1-400	400	148		40%	0,43% (SF)	0,37	51,9 MPa	6,3 MPa	0,87
R2-300	300	168	100% AR2	45%	No utilizado	0,56	28,3 MPa	3,7 MPa	0,70
R2-350	350	173		42%	No utilizado	0,49	35,2 MPa	4,6 MPa	0,78
R2-400	400	148		40%	0,61% (SF)	0,37	50,6 MPa	5,9 MPa	0,83

Tabla 6. Propiedades en estado fresco

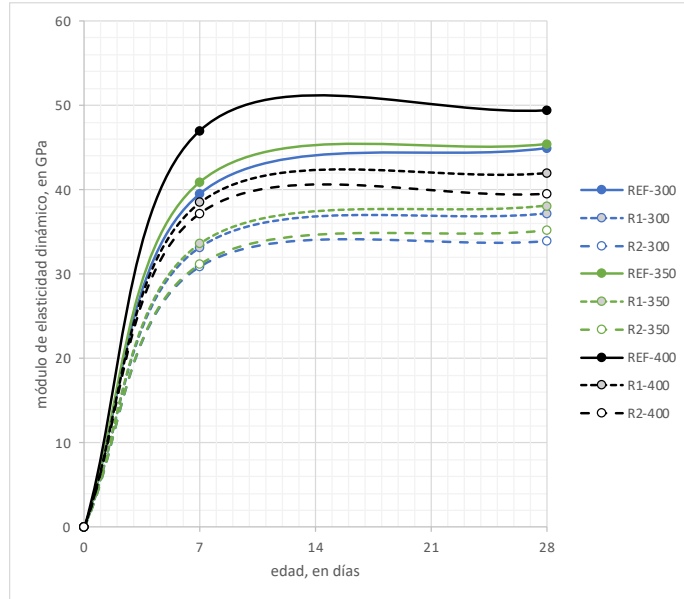
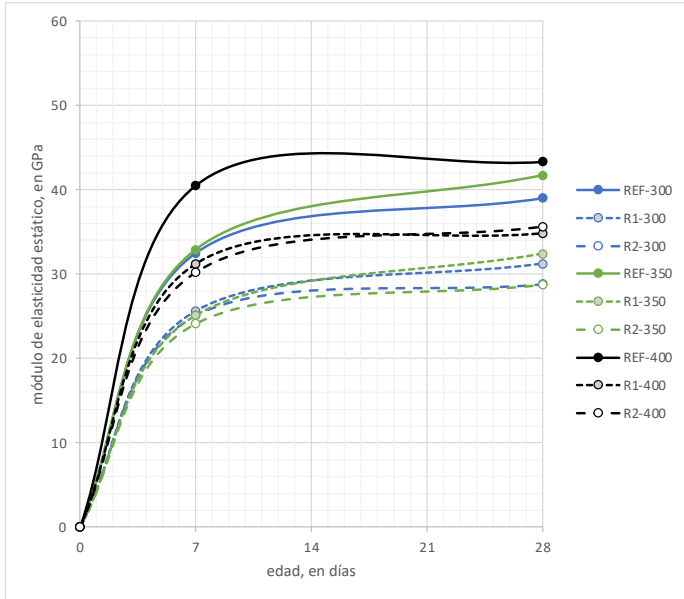
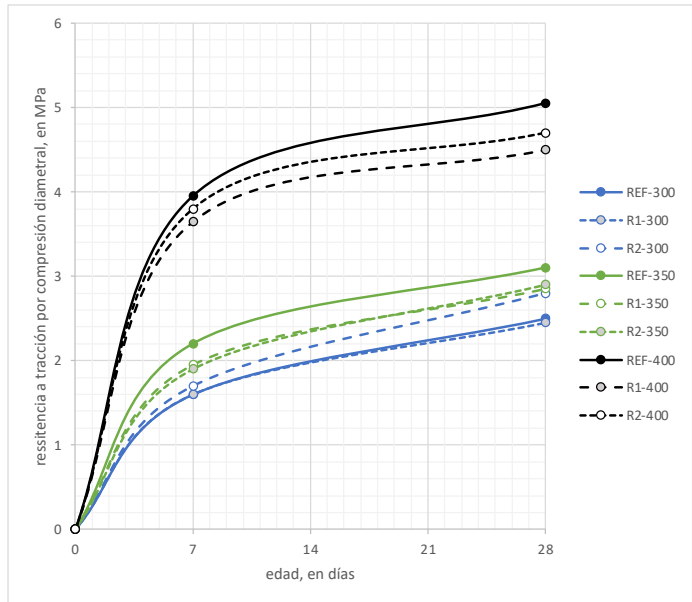
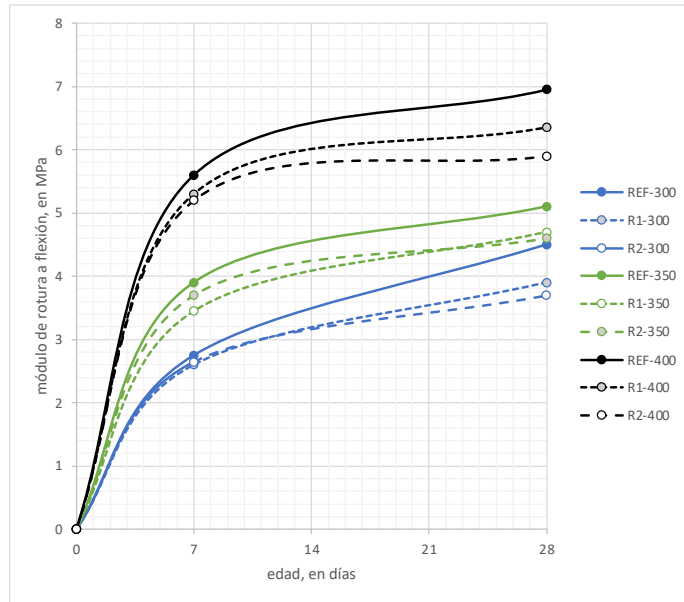
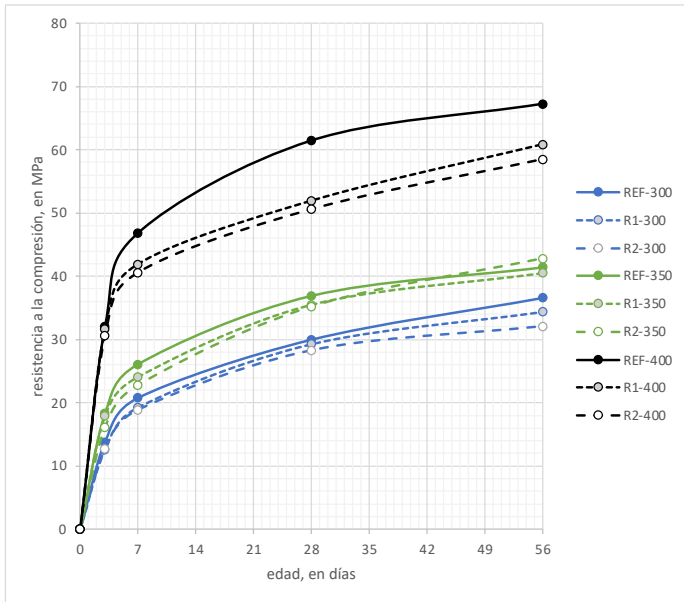
Propiedad y/o Ensayo	Unidad	CUMC 300			CUMC 350			CUMC 400		
		REF	R1	R2	REF	R1	R2	REF	R1	R2
Asentamiento	cm	5,5	5,5	6,0	7,5	8,0	7,5	7,5	8,0	8,5
Peso Unitario PUV	kg/m ³	2395	2295	2261	2403	2302	2267	2439	2338	2308
Contenido de Aire	%	1,5	2,0	1,8	1,3	1,6	1,6	1,8	2,0	1,8

Fuente: Hernández, Claudio y Fornasier, G. (2005), "Caracterización de Hormigones Elaborados con Agregados Gruesos Reciclados" presentado en el Simposio FIB "El Hormigón y el Paso del Tiempo", La Plata (2005).

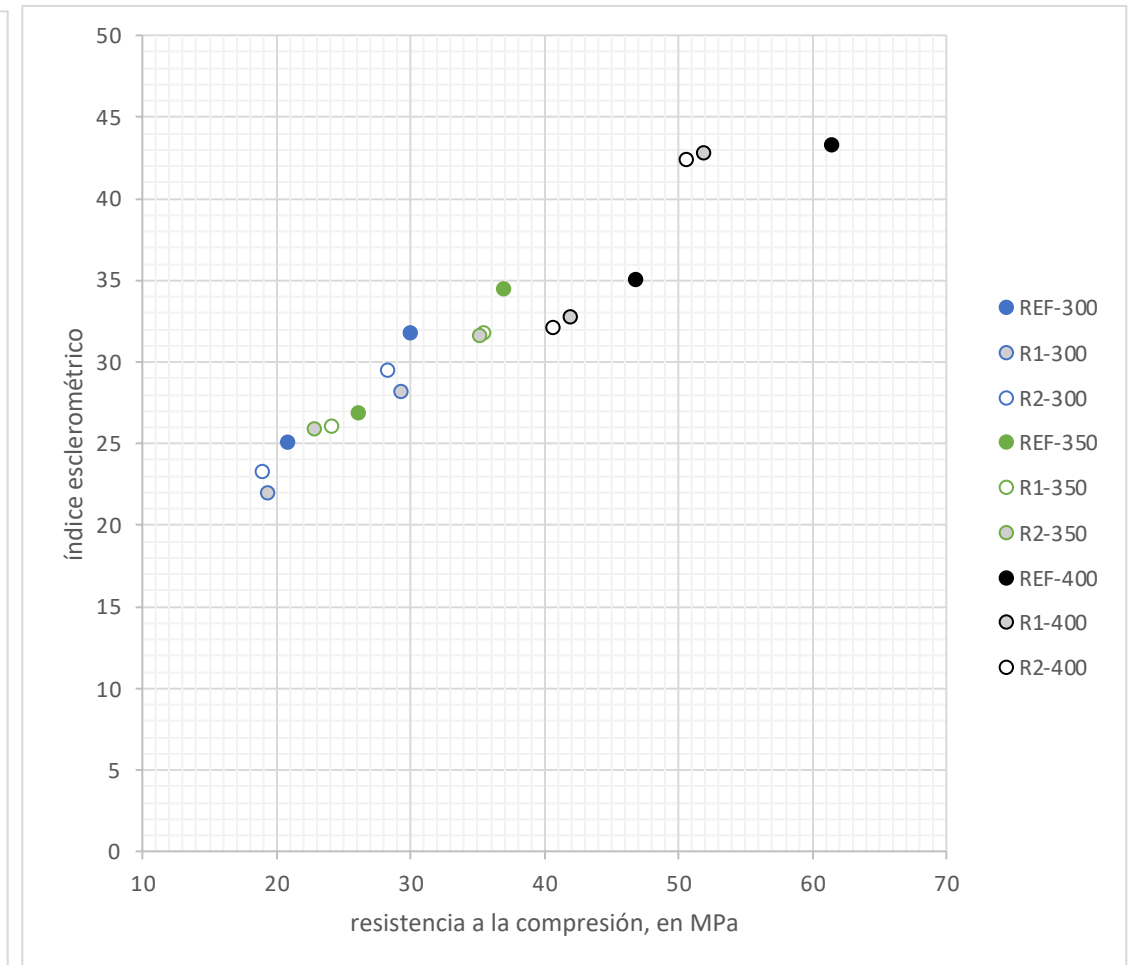
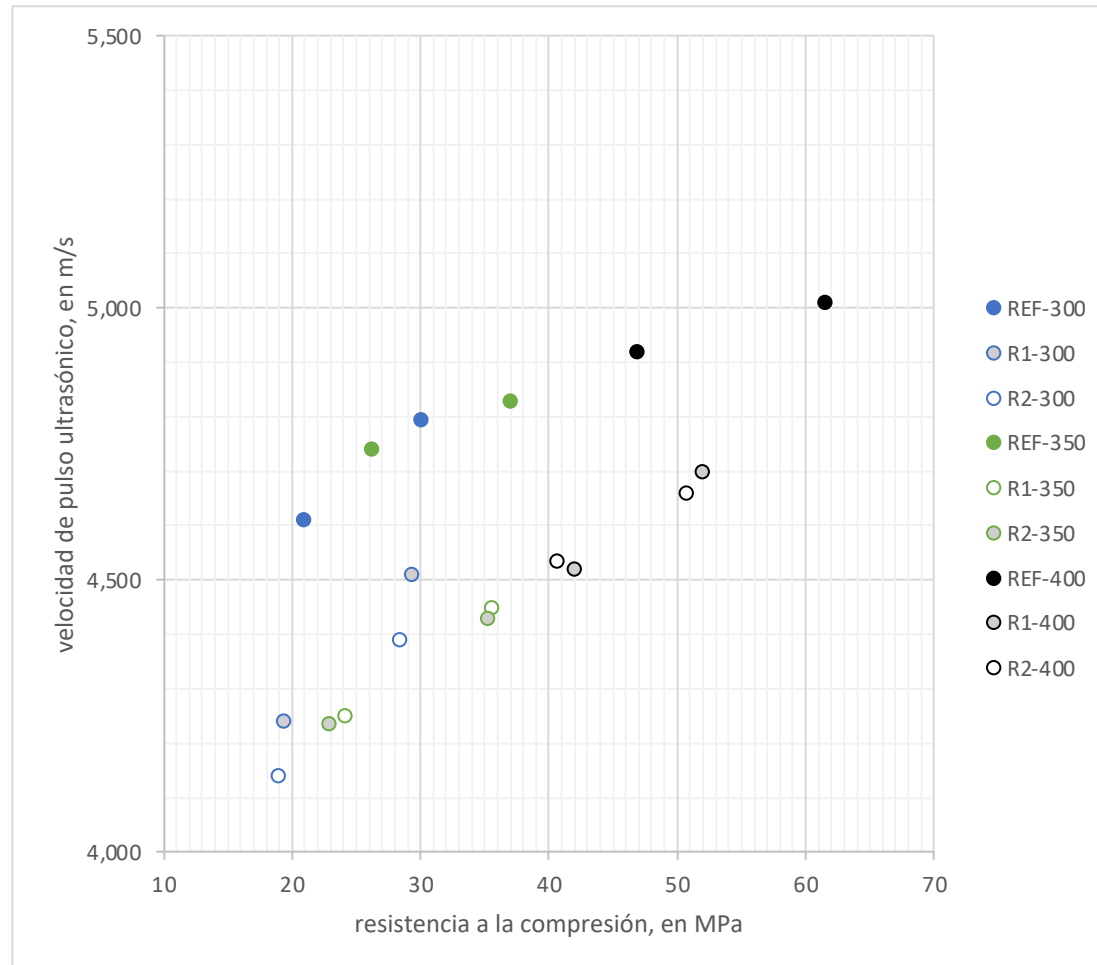
Tabla 7. Propiedades mecánicas de los hormigones estudiados.

Ensayo	Edad [días]	CUMC 300			CUMC 350			CUMC 400		
		REF	R1	R2	REF	R1	R2	REF	R1	R2
Resistencia a la Compresión [MPa]	3	13,8	12,6	12,7	18,3	17,9	16,1	32,0	31,7	30,6
	7	20,8	19,3	18,9	26,1	24,1	22,8	46,8	41,9	40,6
	28	30,0	29,3	28,3	36,9	35,5	35,2	61,4	51,9	50,6
	56	36,6	34,4	32,1	41,4	40,5	42,8	67,2	60,8	58,5
Módulo de rotura a flexión [MPa]	7	2,75	2,60	2,65	3,90	3,45	3,70	5,60	5,30	5,20
	28	4,50	3,90	3,70	5,10	4,70	4,60	6,95	6,35	5,90
Resistencia tracción comp. diametral [MPa]	7	1,60	1,60	1,70	2,20	1,95	1,90	3,95	3,65	3,80
	28	2,50	2,45	2,80	3,10	2,85	2,90	5,05	4,50	4,70
Módulo Elasticidad Estático [GPa]	7	32,5	25,6	25,1	32,9	25,1	24,1	40,5	31,2	30,2
	28	39,0	31,2	28,8	41,7	32,4	28,7	43,3	34,8	35,6
Módulo Elasticidad Dinámico [GPa]	7	39,5	33,2	30,9	40,9	33,6	31,2	47,0	38,5	37,2
	28	44,9	37,2	33,9	45,4	38,1	35,2	49,4	42,0	39,5
Velocidad de pulso ultrasónico [m/seg]	7	4610	4240	4140	4740	4250	4235	4920	4520	4535
	28	4795	4510	4390	4830	4450	4430	5010	4700	4660
Índice Esclerométrico	7	25,1	22,0	23,3	26,9	26,1	25,9	35,1	32,8	32,1
	28	31,8	28,2	29,5	34,5	31,8	31,6	43,3	42,8	42,4

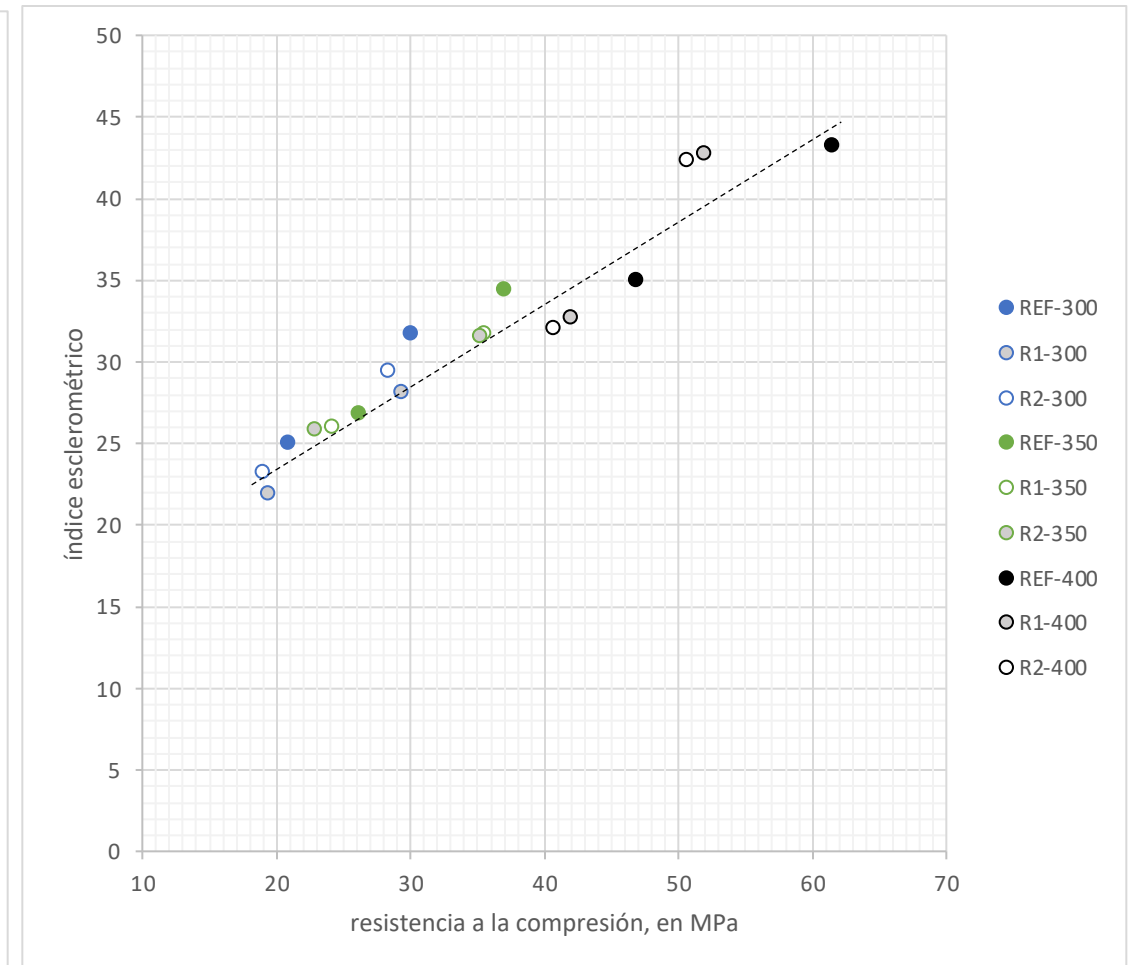
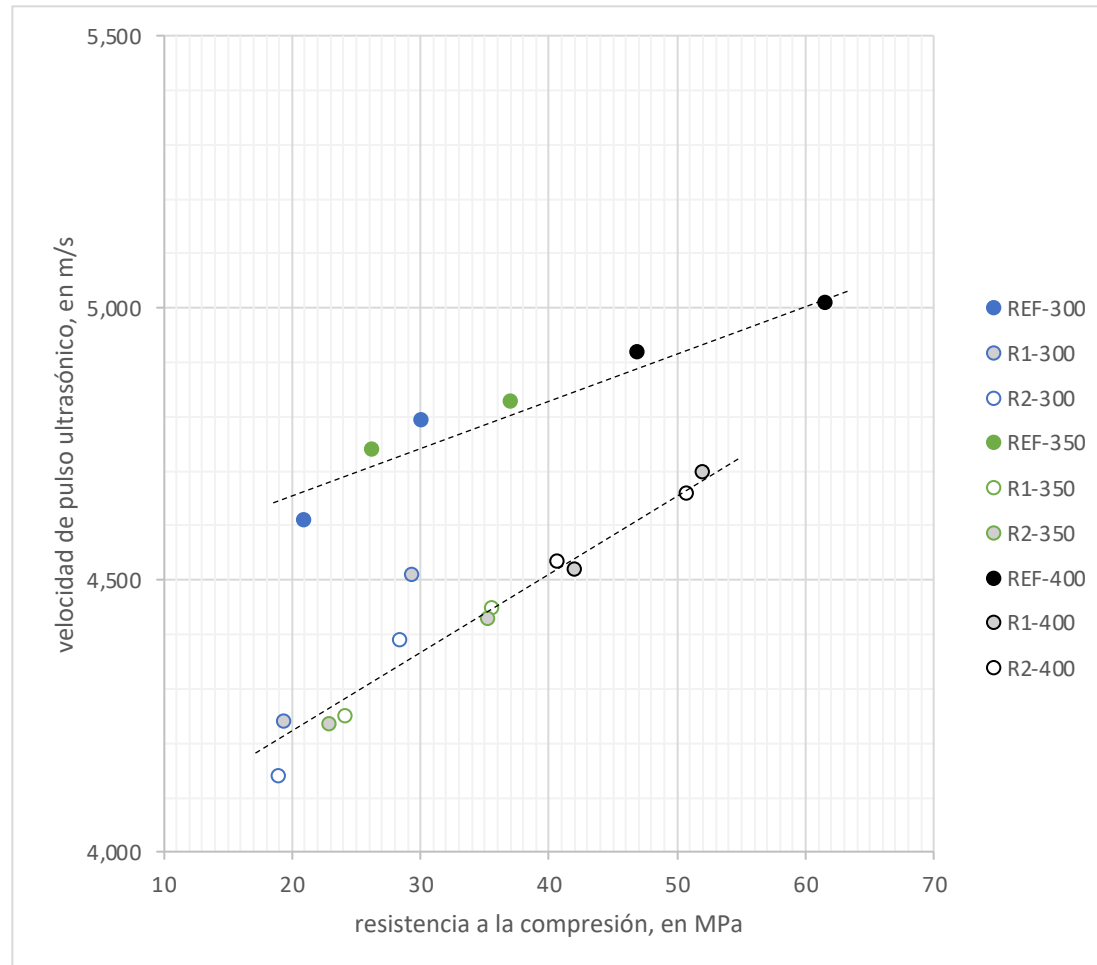
Fuente: Hernández, Claudio y Fornasier, G. (2005), "Caracterización de Hormigones Elaborados con Agregados Gruesos Reciclados" presentado en el Simposio FIB "El Hormigón y el Paso del Tiempo", La Plata (2005).



Fuente: datos tomados del trababajo: Hernández, Claudio y Fornasier, G. (2005), "Caracterización de Hormigones Elaborados con Agregados Gruesos Reciclados" presentado en el Simposio FIB "El Hormigón y el Paso del Tiempo", La Plata (2005).



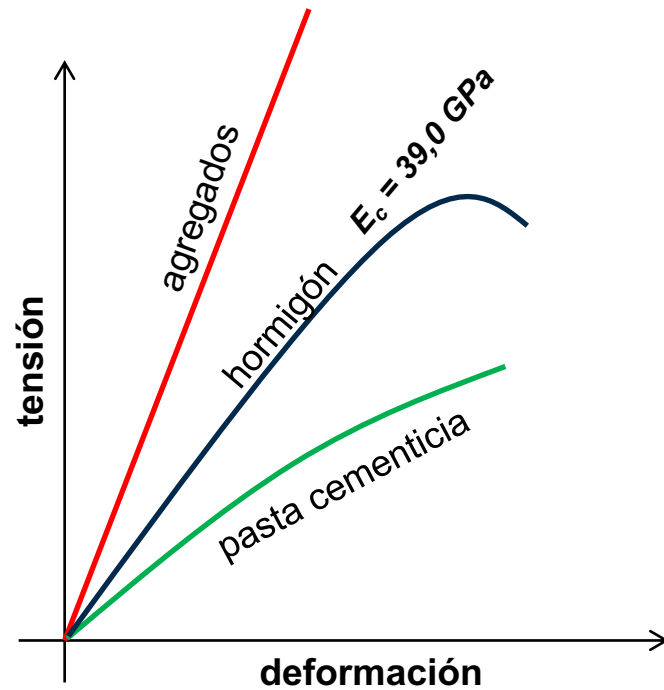
Fuente: datos tomados del trababajo: Hernández, Claudio y Fornasier, G. (2005), “Caracterización de Hormigones Elaborados con Agregados Gruesos Reciclados” presentado en el Simposio FIB “El Hormigón y el Paso del Tiempo”, La Plata (2005).



Fuente: datos tomados del trababajo: Hernández, Claudio y Fornasier, G. (2005), “Caracterización de Hormigones Elaborados con Agregados Gruesos Reciclados” presentado en el Simposio FIB “El Hormigón y el Paso del Tiempo”, La Plata (2005).

BENEFICIOS POTENCIALES DEL USO DE AG (agregado grueso) RECICLADO

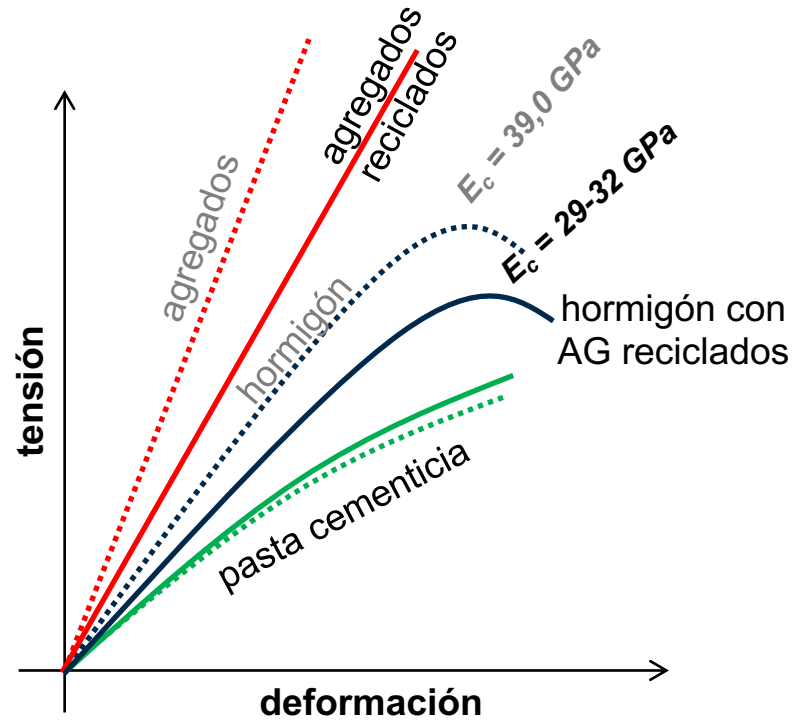
INFLUENCIA SOBRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD, E_c



Fuente: A. Neville, 1996. *Properties of Concrete, Fourth Edition* (adaptado).

BENEFICIOS POTENCIALES DEL USO DE AG (agregado grueso) RECICLADO

INFLUENCIA SOBRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD, E_c



Interpretación de resultados a partir del entendimiento del hormigón como material compuesto.

E. Becker (2010). Trabajo profesional.

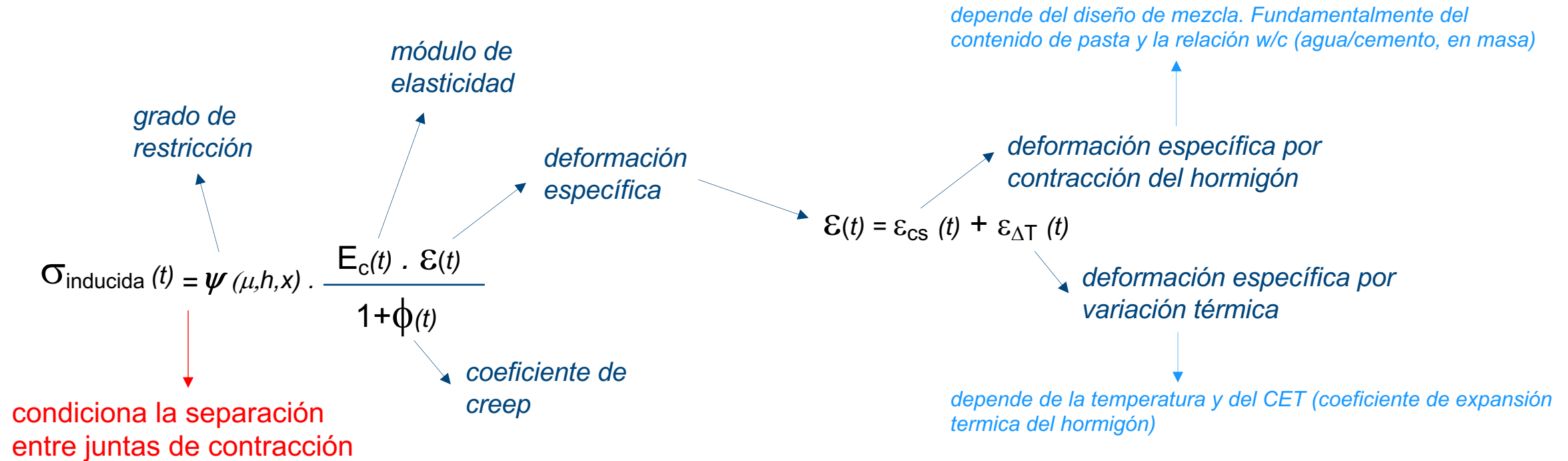
INFLUENCIA SOBRE EL MÓDULO DE ELASTICIDAD, E_c



E. Becker (2010). Trabajo profesional.

BENEFICIOS POTENCIALES DEL USO DE AG (agregado grueso) RECICLADO

DISEÑO DE PAVIMENTO DE HORMIGÓN → sobre una optimización del tamaño de losa



BENEFICIO 1:

El uso de AG (agregado grueso) reciclado en las mezclas de hormigón permitiría un aumento de la separación entre juntas debido a una reducción del módulo de elasticidad. Esto debe ser analizado en cada caso particular ya que también el CET (coeficiente de expansión térmica) presenta una gran influencia sobre este aspecto.

BENEFICIOS POTENCIALES DEL USO DE AG (agregado grueso) RECICLADO

DISEÑO DE PAVIMENTO DE HORMIGÓN → sobre una optimización del tamaño de losa

	Diseño de mezclas para simular MR (módulo de rotura a flexión)						Resultados de la modelación ¹		
	w/c	f' _{cm} (28 días)	MR (28 días)	$k_1 = \frac{MR}{\sqrt{f'_{cm}}}$	$k_2 = \frac{Ec}{\sqrt{f'_{cm}}}$	Ec (28 días)	separación máxima entre juntas transversales, L	reducción relativa de juntas transv.	L/D
REF-300	0,54	30 MPa	4,5 MPa	0,82	7,12	39,0 GPa	3,78 m	-	21
AR1-330	0,51	34 MPa	4,5 MPa	0,77	5,44	31,7 GPa	4,19 m	-10%	23
AR2-340	0,50	35 MPa	4,5 MPa	0,76	4,83	28,6 GPa	4,67 m	-19%	26

(1) a partir de considerar similares tensiones inducidas por contracción y alabeo considerando los módulos de elasticidad obtenidas y diferencias en el CET para clima típico de AMBA (Argentina) y pavimento de 18 cm de espesor (D).

REF-300 → hormigón de referencia con AG granítico triturado y CUMC = 300 kg/m³

AR1-330 → hormigón con 100% de AG reciclado de hormigón 1 y CUMC = 330 kg/m³

AR2-340 → hormigón con 100% de AG reciclado de hormigón 2 y CUMC = 340 kg/m³

BENEFICIO 1:

El uso de AG (agregado grueso) reciclado en las mezclas de hormigón permitiría un aumento de la separación entre juntas debido a una reducción del módulo de elasticidad.

BENEFICIOS POTENCIALES DEL USO DE AG (agregado grueso) RECICLADO

DISEÑO DE PAVIMENTO DE HORMIGÓN → sobre la fisuración y el nivel de servicio

	Diseño de mezclas para similar MR (módulo de rotura a flexión)						Resultados de la modelación ²	
	w/c	f' _{cm} (28 días)	MR (28 días)	$k_1 = \frac{MR}{\sqrt{f'_{cm}}}$	$k_2 = \frac{Ec}{\sqrt{f'_{cm}}}$	Ec (28 días)	Losas fisuradas (20 años) ²	reducción relativa
REF-300	0,54	30 MPa	4,5 MPa	0,82	7,12	39,0 GPa	27%	-
AR1-330	0,51	34 MPa	4,5 MPa	0,77	5,44	31,7 GPa	20%	-26%
AR2-340	0,50	35 MPa	4,5 MPa	0,76	4,83	28,6 GPa	17%	-37%

(2) utilizando el método de diseño OptiPave2™ de TCPavements para diseño de pavimentos en AMBA (Argentina) para tránsito total de 3.000.000 ejes equivalentes en 20 años, considerando losas de hormigón simple sin pasadores de 18 cm de espesor, con juntas cada 1,83 m, borde libre, sin sobreancho, sin drenajes laterales, $k = 4,49-5,38 \text{ kg/cm}^3$ (invierno-verano), confiabilidad del 80% y los datos de w/c, MR y Ec indicados en el cuadro.

REF-300 → hormigón de referencia con AG granítico triturado y CUMC = 300 kg/m³

AR1-330 → hormigón con 100% de AG reciclado de hormigón 1 y CUMC = 330 kg/m³

AR2-340 → hormigón con 100% de AG reciclado de hormigón 2 y CUMC = 340 kg/m³

BENEFICIO 2:

El uso de AG (agregado grueso) reciclado en las mezclas de hormigón tiende a reducir la fisuración debido fundamentalmente a una reducción del módulo de elasticidad.

¿Qué otros beneficios tendría el uso de **AGREGADOS RECICLADOS** obtenidos a partir de la trituración de hormigón "viejo"?

BENEFICIOS POTENCIALES DEL USO DE AG (agregado grueso) RECICLADO

EN TÉRMINOS DE SUSTENTABILIDAD



Situación actual con uso de AG “natural” triturado

Consumo de combustible = 4 a 5 litros/tonelada

Emisiones de GEI = 36 a 54 kg de CO₂/tonelada

(**) considerando de 34 a 40 litros/100 km

(***) considerando de 100 a 150 g de CO₂/t.km)

Considerando pavimentos urbanos de 7,50 m de ancho (el CABA los mismos varían desde un mínimo de 5 a un máximo de 13 m), el volumen de hormigón necesario ronda 135 m³/cuadra.

Entonces, para el transporte de AG tendríamos:

- Consumo de combustible = 594 a 743 litros/cuadra
- Emisiones de GEI = 5,35 a 8,02 toneladas de CO₂/cuadra

BENEFICIO 3:

El uso de AG (agregado grueso) reciclado en las mezclas de hormigón tiende a reducir el consumo de combustible y las emisiones para transporte de materia prima.

BENEFICIOS POTENCIALES DEL USO DE AG (agregado grueso) RECICLADO

RESUMEN

1. El uso de AG (agregado grueso) reciclado en las mezclas de hormigón permitiría un aumento de la separación entre juntas debido a una reducción del módulo de elasticidad. **Esto debe ser analizado en cada caso particular ya que también el CET (coeficiente de expansión térmica) presenta una gran influencia sobre este aspecto.**
2. El uso de AG (agregado grueso) reciclado en las mezclas de hormigón tiende a reducir la fisuración respecto de los homrigones tradicionales debido fundamentalmente a un menor módulo de elasticidad.
3. El uso de AG (agregado grueso) reciclado en las mezclas de hormigón tiende a reducir el consumo de combustible y las emisiones para transporte de materia prima.

Más allá de los evidentes beneficios del uso de materiales reciclados desde el punto de vista sustentabilidad, el uso de AG (agregados gruesos) producidos a partir de la trituración de hormigones viejos en la construcción de pavimentos de hormigón puede permitir ventajas en el comportamiento respecto de soluciones tradicionales. Para que ello suceda, los proyectos deben ser estudiados por profesionales idóneos en la materia ya que es necesario tener control de las variables que influyen sobre el comportamiento del hormigón.

BENEFICIOS POTENCIALES DEL USO DE AG (agregado grueso) RECICLADO

COROLARIO

Una importante cantidad de trabajos publicados demuestran que el reemplazo parcial de hasta un 20% del AG (agregado grueso) “natural” por el AG obtenido a partir de la trituración es aceptable sin mayores estudios ya que no genera prácticamente cambios en el comportamiento del hormigón por lo que es una práctica bastante habitual en el medio.

Sin embargo, como demuestra este trabajo, el uso de AG reciclados en cantidades mayores es posible y, en condiciones controladas puede resultar una solución más eficiente que las tradicionales.

¡GRACIAS por su atención!



@PIARC_Roads



World Road
Association PIARC



World Road
Association PIARC



World Road
Association PIARC

www.piarc.org

Edgardo BECKER

Ingeniero en Construcciones UNCPBA

Gerente de Desarrollo y Servicios Técnicos de LOMA NEGRA

edgardo.becker@hotmail.com

EBecker@lomanegra.com

World Road Association (PIARC)
Grande Arche – Paroi Sud – 5^o étage
92055 – La Défense Cedex – France

