Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Jornadas de Actualización Técnica

Diseño y Construcción de pavimentos urbanos de hormigón

El Hormigón y sus materiales componentes

Auditorio
Municipalidad Malvinas Argentinas
Provincia de Buenos Aires
2 de Junio de 2017 – 8:30 a 9:30 h

Disertante: Ing. Matías Polzinetti
Coordinador División Tecnología del Hormigón ICPA

PAVIMENTOS DE HORMIGÓN
Una solución para la vialidad urbana

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

› VERSATILIDAD

- Adaptables a cualquier proyecto
- Terminaciones, texturas y colores diversas

› SEGURIDAD

- Superficie de alta tracción y resistencia al deslizamiento
- Sin ahuellamiento
- Mejoran las condiciones de visibilidad nocturna

PAVIMENTOS DE HORMIGÓN
Una solución para la vialidad urbana

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

› DURABILIDAD

- Soportan cualquier tipo de carga pesada, sin deteriorarse o deformarse
- Mayor vida útil con mínimas intervenciones
- Resisten esfuerzos de giros, aceleración y frenado
- Sin deterioro por derrame de combustibles o aceites

› SOSTENIBILIDAD

- Menor efecto isla urbana
- Menor consumo de combustible por t/carga transportada
- Reciclables
- Menor consumo energético para igual demanda de iluminación

OBJETIVOS DE UNA ESPECIFICACIÓN Y DISEÑO DE UN HORMIGÓN DE CALZADA

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

› Materiales
- Disponibles localmente
- Aptos para utilizarse en la elaboración de hormigón para calzada

› Hormigón fresco
- Trabajabilidad adecuada
- Cohesión y homogeneidad
- Tiempo de fraguado acorde
- Exudación suficiente
- Temperatura
- TM agregado
- Transporte

› Propiedades resistentes
- Resistencia
- Extensibilidad
- Estabilidad volumétrica

› Durabilidad
- Agentes agresivos externos
- Agentes climáticos
- Ataques interno
- Acciones de uso

› Economía

›Mitigar impactos ambientales
(Sostenibilidad)

PARTICULARIDADES DEL HORMIGÓN COMO MATERIAL…

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Esqueleto granular dentro de una **matriz cementicia,** que le confiere movilidad a la mezcla en estado fresco, y provee adherencia a los agregados en el estado endurecido

1. **Material no homogéneo (fases diferentes). Estructuralmente, se comporta como isótropo y homogéneo**
2. **Resistencia a la compresión >> tracción**
3. **Características dependientes de los materiales que se utilizan, y las condiciones de elaboración y uso**
4. **Capacidad de ser moldeado para las formas y diseños deseados**
5. **Reciclable**

PARTICULARIDADES DEL HORMIGÓN COMO MATERIAL…

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

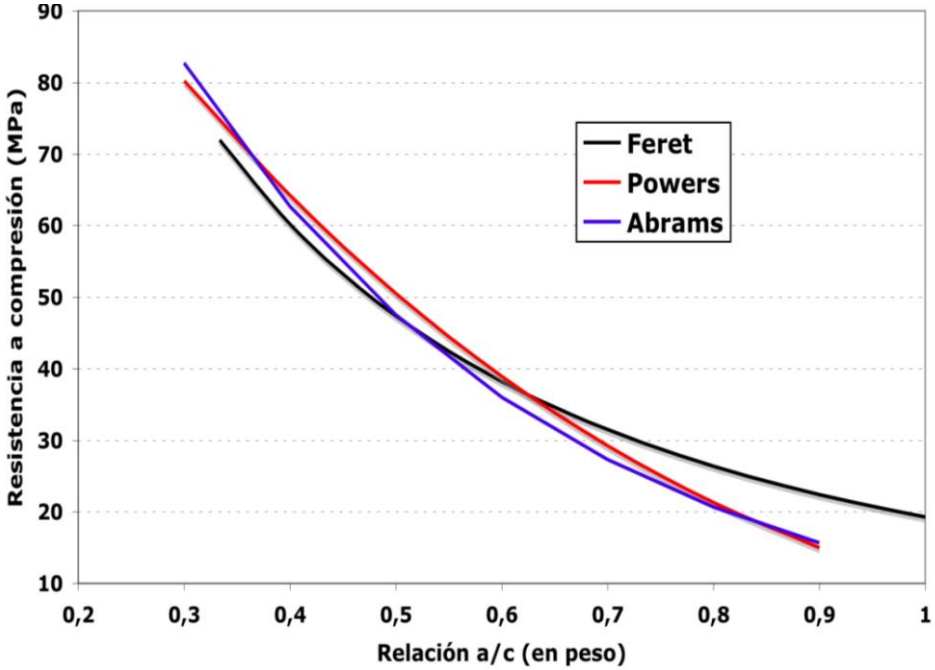
- **El material cementíceo reacciona espontáneamente con agua, y forma compuestos hidratados estables, de crecimiento progresivo.**
- **Proceso exotérmico**
- **2 estados** con propiedades y particularidades específicas
- **1 período de "transición"**

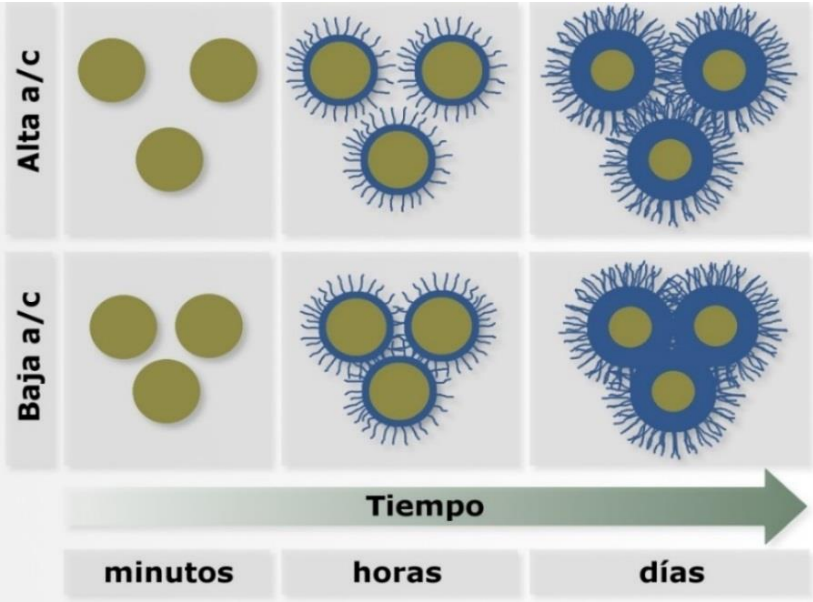
PARTICULARIDADES DEL HORMIGÓN COMO MATERIAL PARA LA CALZADA

Menos agua, menos porosidad y más resistencia…

- La **resistencia y la porosidad de la pasta están íntimamente vinculadas**:

$$R = k\,(1 - p)^3$$ *Ley de Powers*





PARTICULARIDADES DEL HORMIGÓN COMO MATERIAL PARA LA CALZADA

Durabilidad

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- **Procesos de deterioro:** físicos (heladas, abrasión, …), químicos (sulfatos, ácidos, cloruros, RAS, …), electroquímico (corrosión)
- Algunos se asocian a **fenómenos internos**, y otros a **acciones externas**
- **Permeabilidad, Difusión, Succión capilar**
- **Se asocia con una estructura dada, para una cierta función, para una vida útil establecida, y bajo ciertas condiciones de exposición**
- La **a/c como indicador de la durabilidad** (antes la f'c)
- Ensayos normalizados relativos a la durabilidad

PARTICULARIDADES DEL HORMIGÓN COMO MATERIAL PARA LA CALZADA

Durabilidad

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

CIRSOC 201-05

Requisitos	Tipos de exposición de las estructuras, de acuerdo con la clasificación de las Tablas 2.1. y 2.2. y sus complementarias 2.3. y 2.4.									
	A 1	A 2	A 3 y M 1	C L y M 2	M 3	C 1 (2)	C 2 (2)	Q 1	Q 2	Q 3 (3)
a) Razón **a/c** máxima (1)										
Hormigón simple	----	----	----	0,45	0,45	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
Hormigón armado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0, 45	0,40
Hormigón pretensado	0,60	0,50	0,50	0,45	0,40	0,45	0,40	0,50	0,45	0,40
b) $f'_{c\,mín}$ (MPa)										
Hormigón simple	----	----	----	30	35	30	35	30	35	40
Hormigón armado	20	25	30	35	40	30	35	30	35	40
Hormigón pretensado	25	30	35	40	45	30	35	35	40	45
Penetración de agua o succión capilar según 2.2.11.	no	si	si	si	si	si	si	si	si	si

(1) Cuando se use cemento pórtland más una o varias adiciones minerales activas incorporadas directamente en planta elaboradora, se podrá reemplazar la **razón agua/cemento (a/c)**, por la **razón agua/ material cementicio [a/(c+x)]**, que tenga en cuenta la suma del cemento pórtland **(c)** y la cantidad de la adición mineral **(x)**, cuando se trate de puzolanas según norma IRAM 1668:1968 o de escorias según norma IRAM 1667:1990.

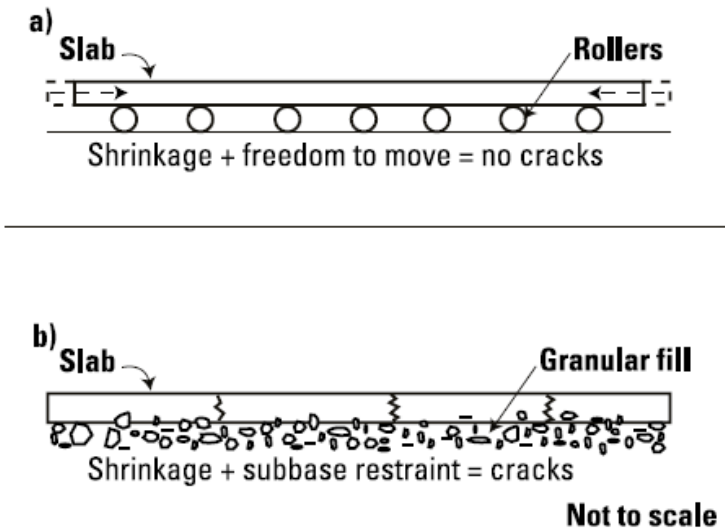
(2) Debe incorporarse intencionalmente aire, en la cantidad requerida en la Tabla 5.3..

(3) Cuando corresponda se debe proteger a la estructura según 2.2.5.2.c3 ó 2.2.10.3.

AUNQUE TAMBIÉN HAY CAMBIOS DE VOLUMEN….

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- **Cambios de volumen** a lo largo del tiempo y por distintas razones:
  - Reacciones químicas (origen interno o externo)
  - Contenido de humedad
  - Gradientes térmicos
  - Cargas actuantes



ACPA

- **Estado de tensión inducido dependerá de:**
  - Grado de restricción
  - Características geométricas de la masa de hormigón
  - Magnitud de la acción (= f (∆T; ∆H; …)
  - Comportamiento del hormigón (Contenido de pasta vs contenido de Agregado, tipo AG, CET, E, Extensibilidad)

→ **Estrategias para acotar la inestabilidad en volumen, y controlar la fisuración.**

Los materiales adecuados, en las proporciones correctas....

CEMENTOS
¿Cómo se componen?

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Componentes principales

Componentes necesarios

Componentes opcionales

Cemento

Clínker

+

Sulfato de calcio (Yeso)

+

Adiciones minerales

+

Componentes minoritarios

4 componentes

- Alita (Silicato tricálcico): SC_3 → Ganancia de resistencia; fraguado
- Belita (Silicato dicálcico): SC_2 → Incide en la ganancia de resistencia a mayor edad
- Aluminato tricálcico: AC_3 → Fraguado
- Ferroaluminato tetracálcico: AFC_4

Regulador del proceso de fraguado de la pasta cementicia

Filler Calcáreo

Ceniza volante

Escoria Granul. AH

Puzolanas

- Inertes, o con propiedades hidráulicas o puzolánicas
- De origen natural, artificial, derivados de la fabricación de clinker, o producto no conforme
- Convenientemente dosificados, pueden mejorar las propiedades físicas de los cementos

ADICIONES MINERALES

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Razones y objetivos de su utilización

- Mejoran las propiedades y desempeño de los cementos
- Mejoran la relación costo-beneficio
- Implicancias ambientales / Sostenibilidad
- Uso de subproductos de otras industrias / reducción del material a disponer

Ventajas y efectos, según tipo de material y proporciones

Argentina: adición en fábricas de cemento (mayoría)

ADICIONES MINERALES

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

SIN ACTIVIDAD HIDRÁULICA

- Fíller Calcáreo

CON ACTIVIDAD HIDRÁULICA

- Con Actividad Puzolánica
  - **Naturales**: cenizas volcánicas, arcillas, tobas, diatomeas, metacaolinita
  - **Artificiales**: cenizas volantes silíceas, humo de sílice, microsílice, ceniza de cáscara de arroz
- Con Actividad Hidráulica propia
  - **Artificiales**: escoria granulada de alto horno, cenizas cálcicas

CEMENTOS
Marco normativo

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

IRAM 50000

Cemento para uso general

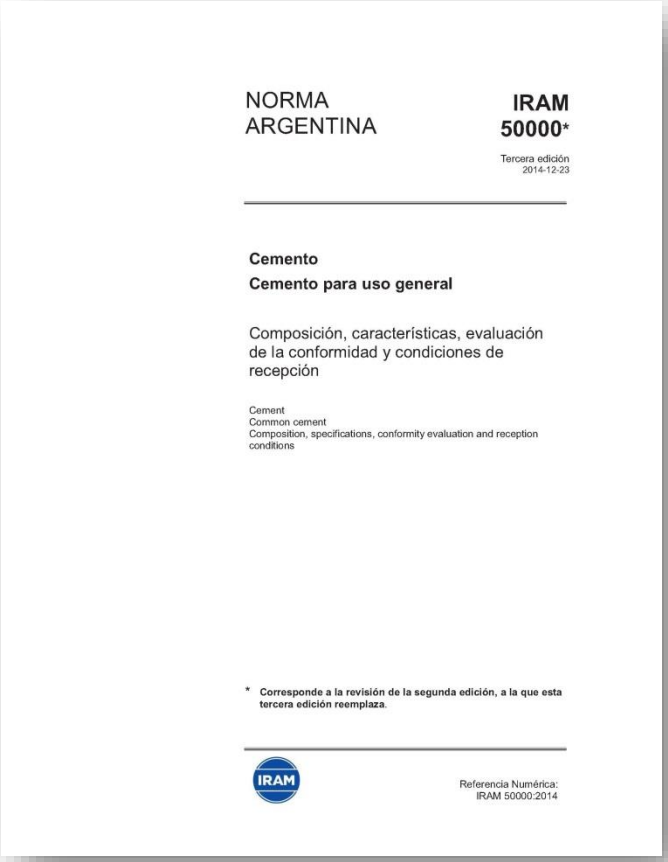
IRAM 50001

Cemento con propiedades especiales

- Composición de los cementos
- Requisitos
- Designación según composición, categorías y propiedades especiales
- Evaluación de la conformidad para la certificación obligatoria

↓

Prontamente, a IRAM 50003



NORMA ARGENTINA

IRAM 50000*

Tercera edición 2014-12-23

Cemento

Cemento para uso general

Composición, características, evaluación de la conformidad y condiciones de recepción

Cement
Common cement
Composition, specifications, conformity evaluation and reception conditions

* **Corresponde a la revisión de la segunda edición, a la que esta tercera edición reemplaza.**

IRAM

Referencia Numérica: IRAM 50000:2014

Cementos de uso general
Norma IRAM 50000

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

1. Cemento Portland Normal (CPN)
2. Cemento Portland con Filler calcáreo (CPF)
3. Cemento Portland con Escoria (CPE)
4. Cemento Pórtland Compuesto (CPC)
5. Cemento Pórtland Puzolánico (CPP)
6. Cemento de Alto Horno (CAH)

CEMENTOS PARA USO GENERAL
Norma IRAM 50000

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Tipo de cemento[5]	Nomenclatura	Composición[2] (g/100 g)				
		Componentes principales				Componentes minoritarios
			Adiciones			
		Clínker + sulfato de calcio	Puzolana y/o ceniza volante silícea (P y/o CV)	Escoria (E)	"Filler" calcáreo (F)	
Cemento pórtland normal	CPN	100-95	–	–	–	0-5
Cemento pórtland con "filler" calcáreo	CPF	94-75	–	–	6-25	0-5
Cemento pórtland con escoria	CPE	94-65	–	6-35	–	0-5
Cemento pórtland compuesto[3]	CPC	94-65	dos o más, con: $6 \leq (P \text{ y/o } CV + E + F) \leq 35$ y con $F \leq 25$			0-5
Cemento pórtland puzolánico [4]	CPP	85-50	15-50	–	–	0-5
Cemento de alto horno	CAH	64-25	–	36-75	–	0-5

CEMENTOS CON PROPIEDADES ESPECIALES
Norma IRAM 50001

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

a. Alta Resistencia Inicial (ARI)

b. Altamente Resistente a los Sulfatos (ARS)

c. Moderadamente Resistente a los Sulfatos (MRS)

d. Bajo Calor de Hidratación (BCH)

e. Resistente a la Reacción Álcali-Agregado (RRAA)

f. Blanco (B)

CEMENTOS PARA USO VIAL (TAR)

Norma IRAM 50002

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Tipo de cemento (5)	Nomenclatura	Composición (2) (g/100 g)				
		Clínker + sulfato de calcio	Puzolana o ceniza volante silícea (P ó CV)	Escoria (E)	"Filler" calcáreo (F)	Comp. minori-tarios
Cemento pórtland normal	CPN	100-95	---	---	---	0-5
Cemento pórtland con "filler" calcáreo	CPF	94-80	---	---	6-20	0-5
Cemento pórtland con escoria	CPE	94-80	---	6-20	---	0-5
Cemento pórtland compuesto (3)	CPC	94-80	dos o más, con: $6 \leq (P \text{ ó } CV + E + F) \leq 20$			0-5
Cemento pórtland puzolánico (4)	CPP	85-80	15-20	---	---	0-5

Límite al 20%

CEMENTOS
Denominación

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Ejemplo: CPN 50 (ARI, MRS)

Tipo	Categoría	Propiedades especiales	¿Uso vial con TAR?
CPN CPF	C 30	ARI ARS	
CPE CPC	C 40	MRS BCH	TAR
CPP CAH	C 50	RRAA B	
IRAM 50000		IRAM 50001	IRAM 50002

DOSIFICACIÓN DE ADICIONES MINERALES EN LA ELABORACIÓN DEL HORMIGÓN

Requisitos

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- Si se **incorporan adiciones minerales al momento de la dosificación del hormigón**, verificar:
  - Aptitud de cada adición por separado (IRAM 1667, IRAM 1593, IRAM 1668, ASTM C1240) -**Mensual**-
  - Control de requisitos IRAM 50000 o 50002 para la combinación cemento-adición -**Trimestral**-
  - Verificación de límites de composición del material cementíceo resultante de la combinación

Otras recomendaciones:

- Planta hormigonera certificada (MODO 1)
- CUC y a/c se reemplazan por CUMc y a/mc
- Combinación con cualquier cemento "base"
- El contenido excedente al límite de normas IRAM no se computa como parte del CUMc ni para calcular la a/mc
- Estudios previos de prueba con pastones de hormigón

CEMENTOS
Criterios para la selección

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- **Para resistencia a 28 d, guiarse por la categoría del cemento** y no por su tipo

- La presencia de adiciones no necesariamente condiciona el desarrollo de resistencia vs un cemento que no las tiene.

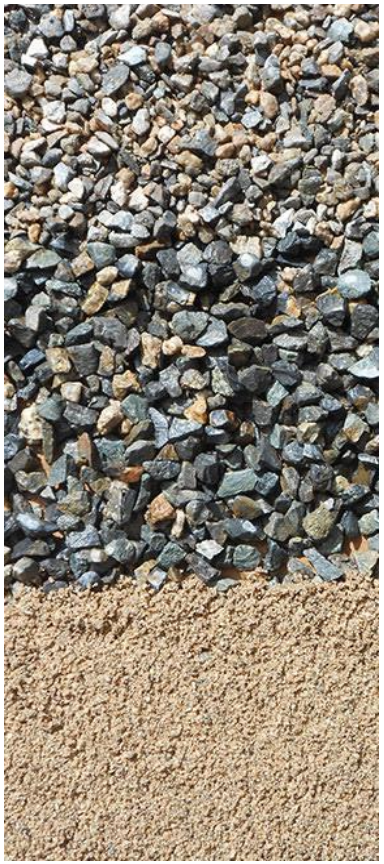
- Cuando la agresión es externa, la durabilidad de una depende de la calidad del recubrimiento. El tipo de cemento juega un "rol" secundario.

- En hormigones con agregados reactivos, es "clave" la correcta selección del tipo de cemento

AGREGADOS

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- Por su origen, tienden a presentar mayor variabilidad
- Ocupan entre el **60 y el 80 % del volumen**
- **Incidencias sobre:** costo, demanda de agua, trabajabilidad, módulo de elasticidad, estabilidad dimensional, durabilidad, CET, contracción por secado
- **IRAM 1512** (Agregados finos) e **IRAM 1531** (Agregados gruesos)
- **3 tipos:** naturales, manufacturados, reciclados



Al menos, 3 fracciones granulométricas distintas (usualmente, 4), para ajustar distribución granulométrica.
TM < 1,5 “ (38 mm)

AGREGADOS

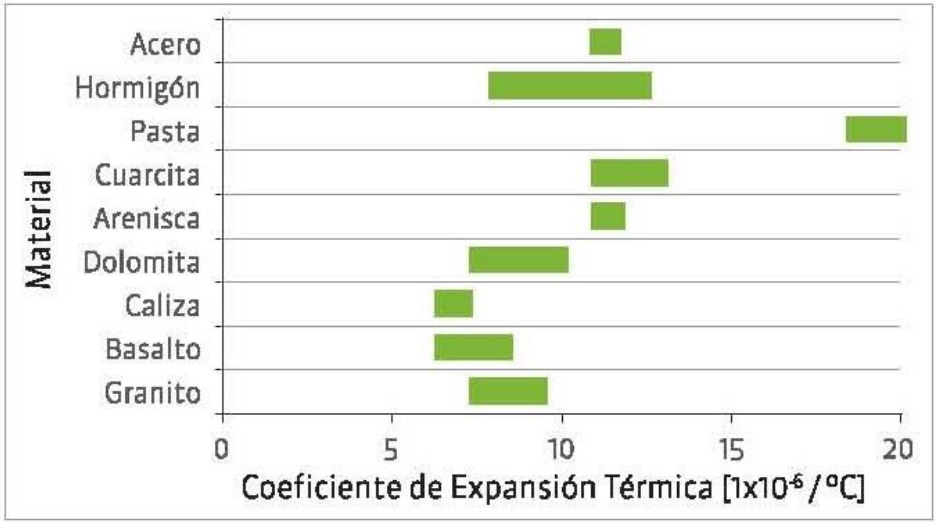
Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- **Forma:** cúbicas, lajosas, elongadas
  - Fricción / Trabazón
  - Resistencia a la abrasión
- **Textura:** lisas y suaves, a rugosas y ásperas
  - Rugosidad superficial
  - Adherencia agregado-pasta
- **Presencia de polvo**
  - Adherencia agregado / pasta
  - Consumo de agua
- **Granulometría**
  - Vacíos - consumo de pasta
  - Economía
  - Estabilidad volumétrica

AGREGADOS

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- **Expansión térmica**
  - Alabeos
  - Fisuración
  - Rotura de esquinas
  - Levantamiento de losas



- **Resistencia al desgaste**
  - Fragmentación
  - Desgaste superficial
  - Roturas de bordes de juntas

- **Módulo de elasticidad**
  - Deformabilidad
  - Extensibilidad

- **Estabilidad:** menor tendencia a fisuración

- **Presencia de impurezas:** arcillas, partículas carbonosas, ligeras y friables, sales, materia orgánica, cloruros, sulfatos, álcalis

AGREGADOS RECICLADOS

- Perfil **sustentable**
- **Permiten:**
  - reducir los costos de producción
  - aumentar la extensibilidad
  - reducir el módulo de elasticidad E
- **Menor densidad y mayor absorción de agua**
- Incluidos en la IRAM 1531 (AG) a partir del 2016
- Cuidados en la producción y el control de uniformidad
- Antecedentes locales para uso en bases de hormigón pobre

AGREGADOS
Ajuste granulométrico

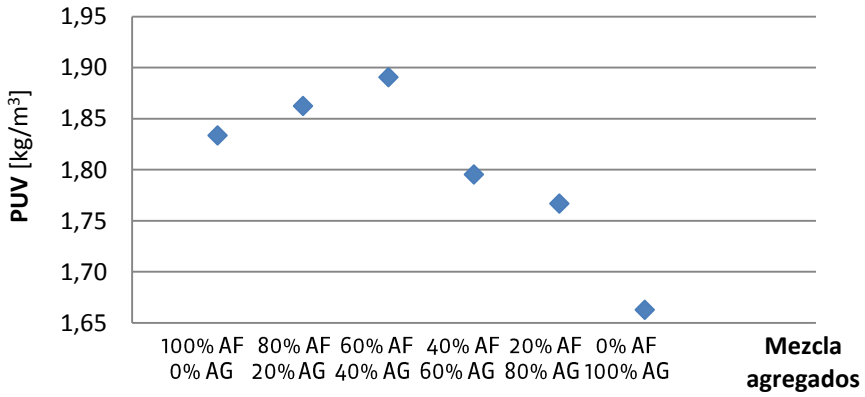
Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Determinación de las proporciones óptimas:

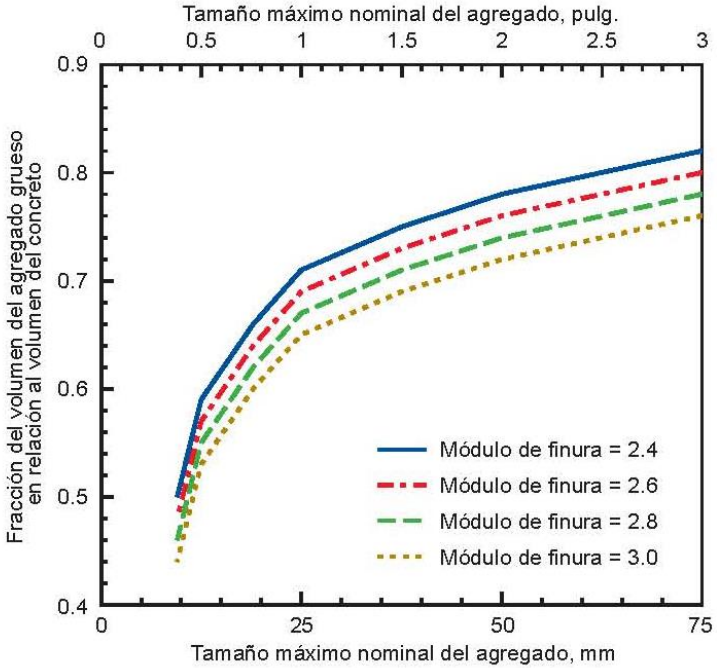
-Según normas o desempeño previo comprobado
-Ábacos
-Criterios de máxima compacidad

+ Ajustes

Criterio máxima compacidad



ACI. Volumen de AG por unidad de volumen de hormigón, en función del TM y MF



› No siempre máxima compacidad es aplicable.
› Tener en cuenta trabajabilidad.

AGUA DE AMASADO

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Cantidad de agua total contenida en el hormigón fresco utilizada para el cálculo de la relación a/c

- **Compuesta por:**
  - Agua agregada a la mezcla
  - Humedad superficial de los agregados
  - Agua proveniente de los aditivos
- **Debe cumplir la norma IRAM 1601**
- **Doble función:**

1- Hidratación

2- Trabajabilidad/Compactación

AGUA DE AMASADO
Tipos y controles

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- **Tipos de aguas**
  1. Agua de red potable
  2. Agua proveniente de la recuperación de procesos de la industria del hormigón
  3. Agua procedente de fuentes subterráneas
  4. Agua de lluvia
  5. Agua superficial natural
  6. Aguas residuales industriales

- **Requisitos**
  1. Químicos: presencia de sustancias nocivas
  2. Físico-mecánicos TF (dif ≤ ± 25%)
     Resistencia a la compresión 7 d (dif > -10%)

AGUA DE AMASADO
Frecuencias de control

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

1) **Para agua de red**
   - Anual

2) **Para agua de pozo, río, lluvia, subterráneas, de mar**
   - Cada 3 meses
   - Cuando 3 muestras consecutivas son conformes, puede ampliarse a control anual

3) **Para agua reciclada**
   - Cada 3 meses

ADITIVOS QUÍMICOS
Características

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- Producto industrial
- Aptitud y control según norma **IRAM 1663**
- Suministro con sistemas de precisión suficiente (± 3%)
- En ciertas circunstancias, pueden compensar deficiencias

- **Si se usa más de 1, no mezclarlos antes del ingreso a la mezcladora, y verificar compatibilidad**
- Identificación unívoca, por tipo y lote / partida
- **Verificar la el efecto, la dosis y la oportunidad de adición según datos del fabricante y pruebas de laboratorio y producción.**

ADITIVOS QUÍMICOS
Reductores de agua

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Repulsión electrostática o por adsorción superficial y repulsión estérica, ejerciendo un **efecto dispersante** de los flóculos

↓

Aumentar la movilidad de la mezcla, al quedar más agua libre

Bajo rango ▪ Medio rango ▪ Alto rango

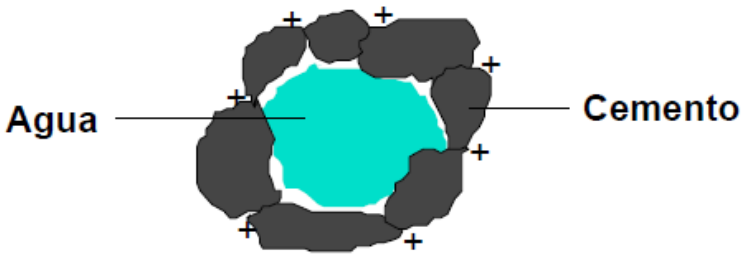
1) **Mejora movilidad en HF, para = a/c, CUC y CUA**
2) **Reducción del CUC, para = a/c, con < CUA e = consistencia**
3) **Menor a/c, con menor CUA e igual consistencia**

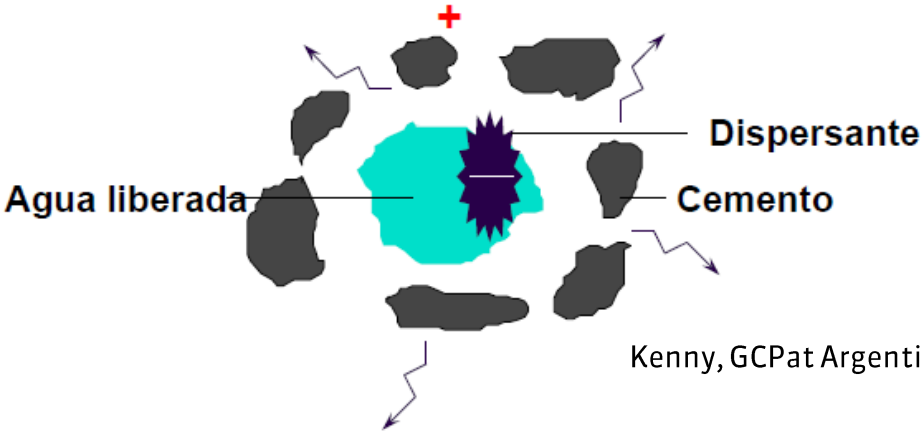
- Mejores resultados se obtienen al dosificarlos una vez que el cemento ha entrado en contacto con agua, y se ha iniciado el mezclado (tiempo de espera > 20 a 30 s).
- Los superplastificantes se dosifican a pie de obra

ADITIVOS QUÍMICOS
Reductores de agua

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

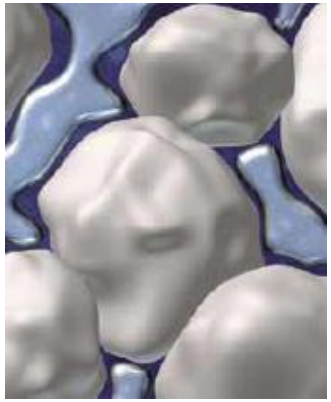
- Repulsión electrostática

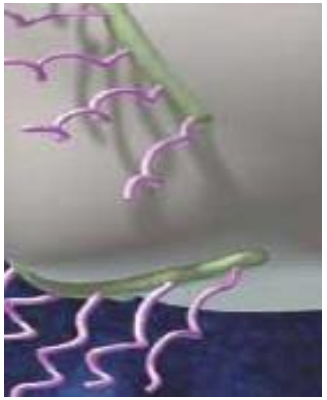


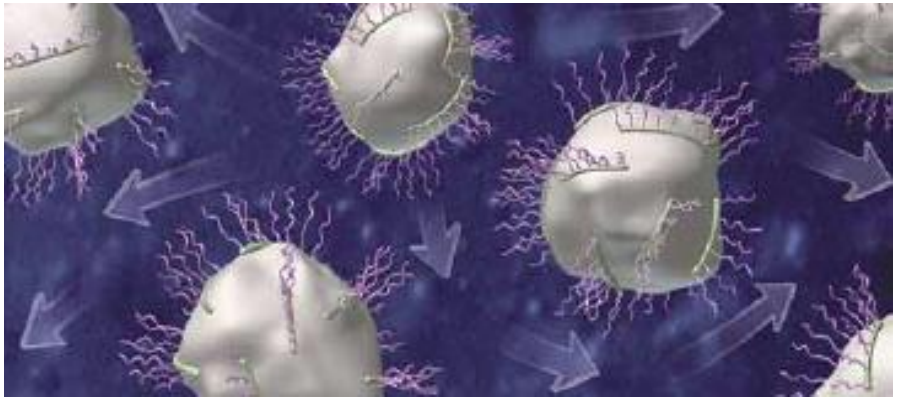


Kenny, GCPat Argentina

- Repulsión estérica



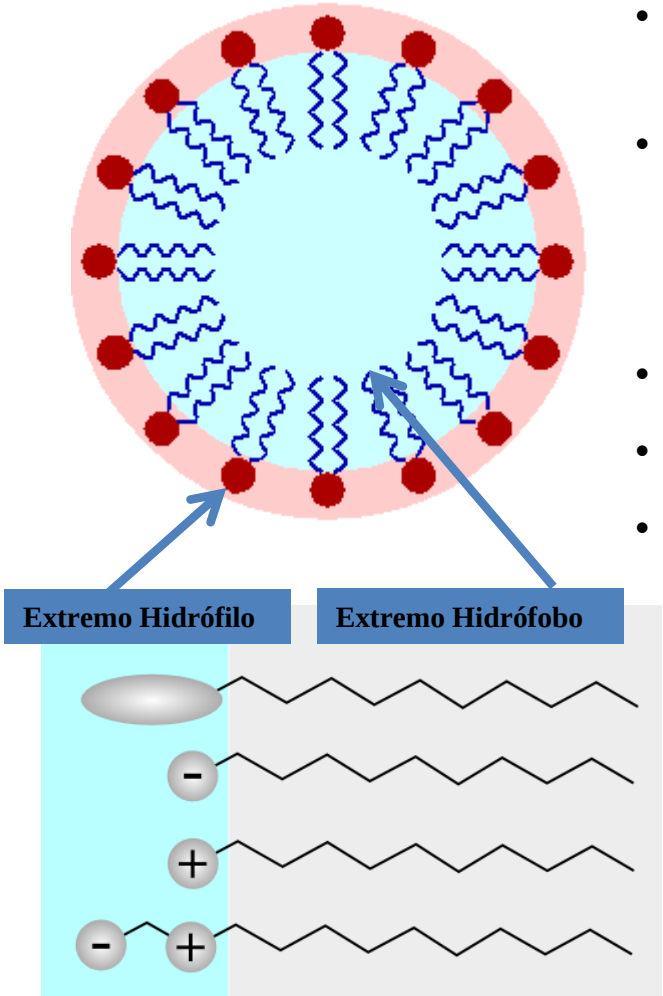




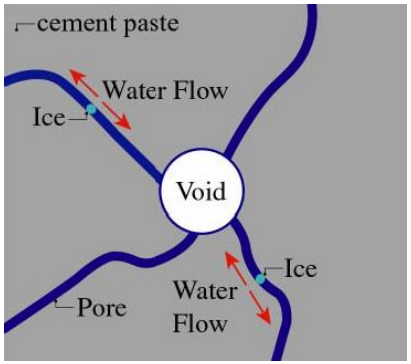
Jeknavorian, Grace US

ADITIVOS QUÍMICOS
Incorporadores de aire

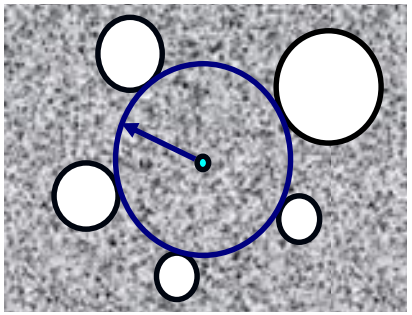
Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica



- Dosis habituales: entre 0,02% y 0,10 %
- Reducción de la tensión superficial del agua y adsorsión en la interfase líquido-gas
- Distribución uniforme
- Tamaño: 50 μm < ∅ < 1mm
- Espaciamiento: F.E. < 0,2 mm



Mehta

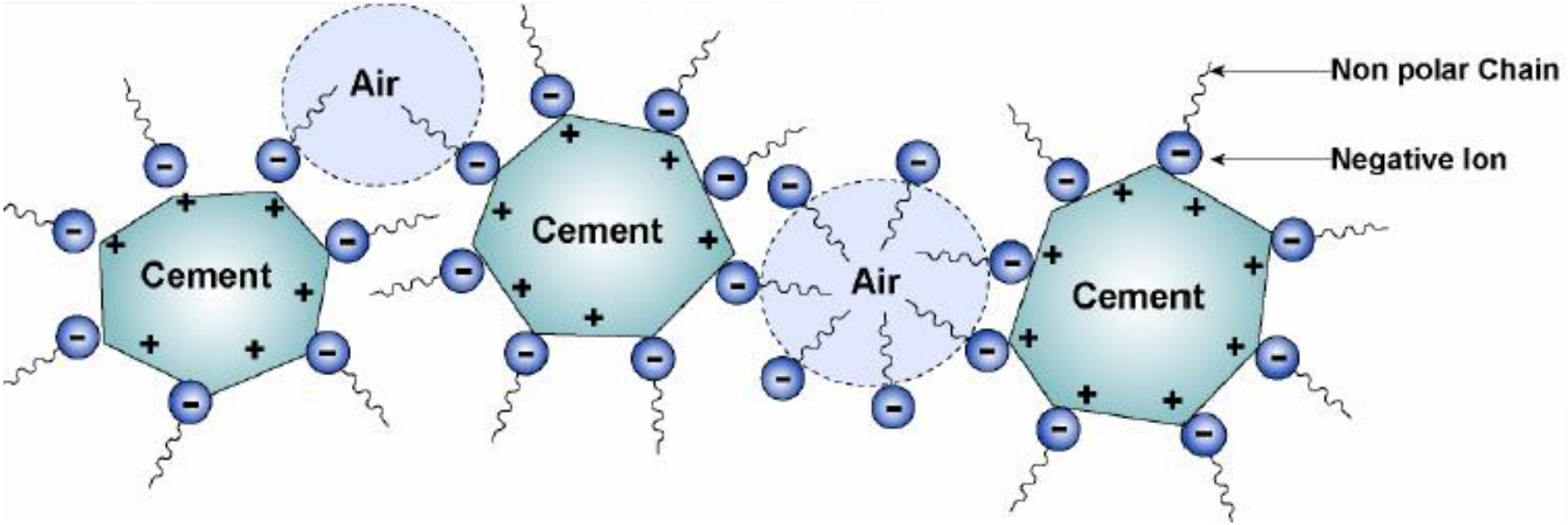


Taylor

- Mejora la trabajabilidad / movilidad en estado fresco
- < tendencia a la segregación / < fricc. Interparticular
- Mejora la durabilidad frente a ciclos de C-D y acción de sales descongelantes
- > Cohesión
- < Exudación
- Puede provocar disminución de resistencia mecánica

ADITIVOS QUÍMICOS
Incorporadores de aire

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica



P.K. Mehta and P.J.M. Monteiro,
Concrete: Microstructure, Properties, and Materials.
University of Berkeley

“Un hormigón bueno y uno mal están constituidos por los mismos materiales, y la diferencia radica en **cómo están hechos...**”

Adam Neville

¿QUÉ NECESITAMOS EN UN HORMIGÓN DE CALZADA?

Trabajabilidad

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Facilidad con que el hormigón puede ser **mezclado, transportado, colocado y compactado** con los medios disponibles en obra.

- **No depende exclusivamente de las características del hormigón**
  (Ver: equipamiento de mezclado y transporte, los métodos de colocación y compactación a utilizar, terminación)

- **Influenciada por** el clima, distancias de transporte, tiempo y forma de descarga

- **Medimos la consistencia como parámetro indirecto**

¿QUÉ NECESITAMOS EN UN HORMIGÓN DE CALZADA?

Cohesión

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Aptitud para mantenerse como masa plástica, sin segregación

Depende de:

- contenido material fino (pasa 300 µm)
- la cantidad de agua
- el asentamiento
- aire intencionalmente incorporado

No hay un método cuantitativo para medir la segregación

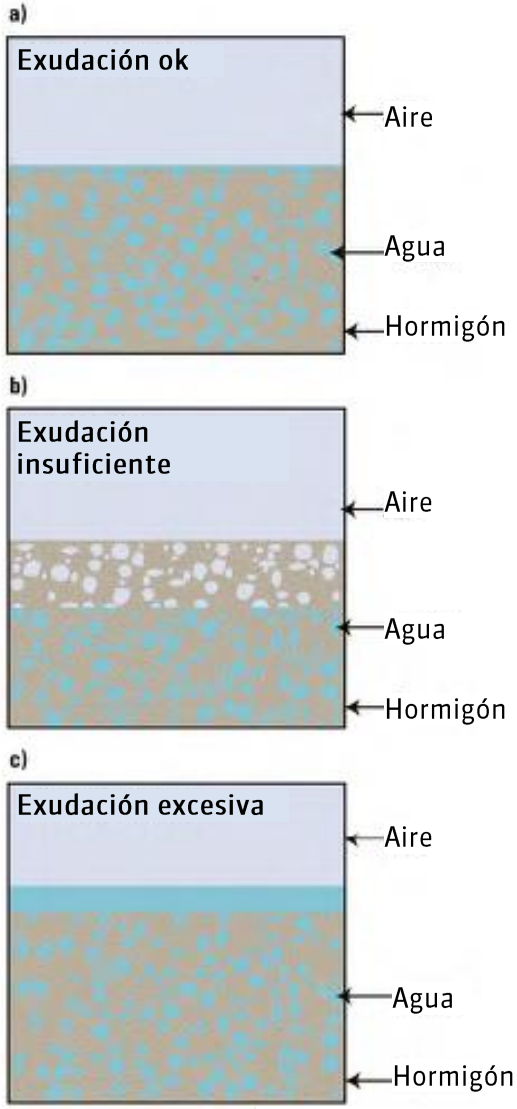
EXUDACIÓN:
¿DESEABLE O CONTRAPRODUCENTE?

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Exudación ok

Riesgo de fis.

Exud. excesiva



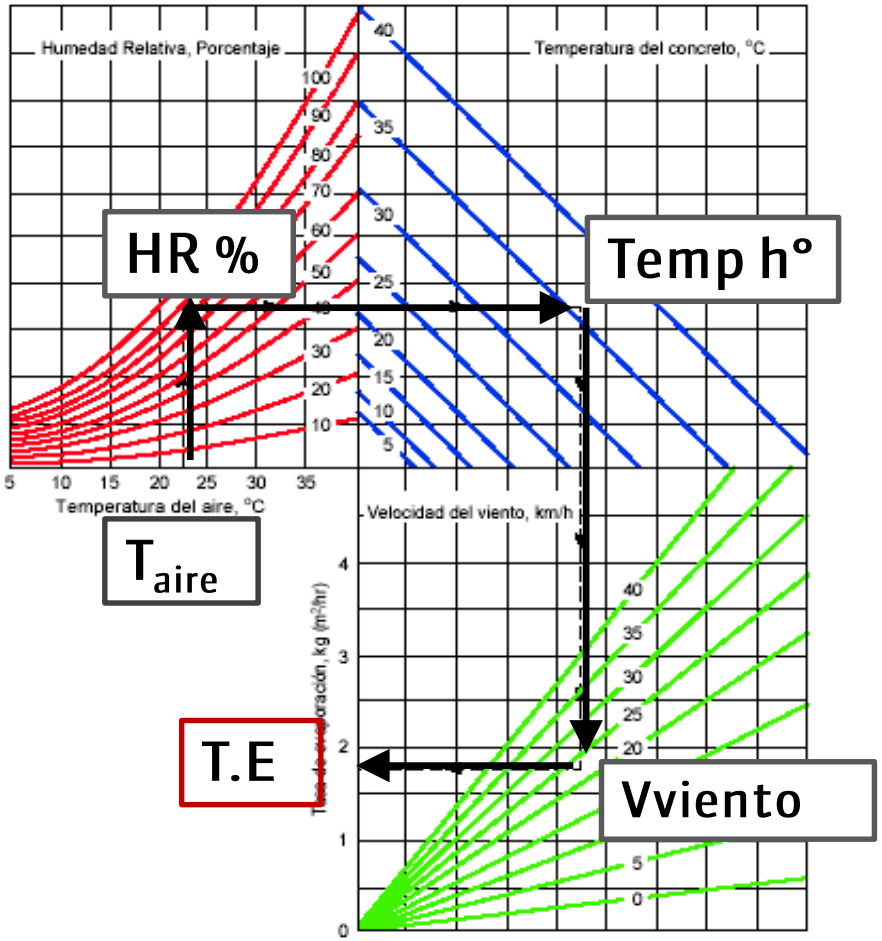
Ozildirim

AJUSTE DE EXUDACIÓN PARA MITIGAR FISURACIÓN POR CONTRACCIÓN PLÁSTICA

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Para usar este gráfico:

1. Entre con la temperatura del aire y muévase hacia la humedad relativa.
2. Muévase hacia la derecha para la temperatura del concreto.
3. Muévase hacia abajo para la velocidad del viento.
4. Muévase hacia la izquierda y lea la tasa de evaporación aproximada.



DISEÑAR LA MEZCLA PARA UNA VELOCIDAD DE EXUDACIÓN MAYOR A LA DE EVAPORACIÓN

CÓMO MITIGAR FISURACIÓN POR CONTRACCIÓN PLÁSTICA

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- **Ajustar el diseño de la mezcla de hormigón, compatibilizando su exudación con la tasa de evaporación prevista**

- **Acotar la tasa de evaporación de agua:**
  -Colocando protecciones perimetrales cortaviento
  -Utilizando parasoles
  -Aplicación de fino spray de agua en el ambiente

- **Adecuar los horarios de trabajo a los momentos de la jornada que resultan más convenientes**

- **Emplear procedimientos de curado eficaces**

AJUSTE DE EXUDACIÓN EN LA MEZCLA DE HORMIGÓN

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Factores a tener en cuenta:

- Finura del cemento y adiciones minerales, y sus contenidos en el hórmigón
- Relación agregado fino : grueso (Especialmente, fracción pasa 300 µm)
- Contenido de agua de amasado en el hormigón
- Uso de aditivos químicos (incorporador de aire, reductor de agua, ..)
- Tiempo de fraguado de la mezcla de hormigón

› Velocidad y capacidad de exudación: medir según **Norma IRAM 1604.**

› Medir en **laboratorio y en obra**

› Cuidado con **Tasas de evaporación** › 0,25-0,50 kg/m2/h !

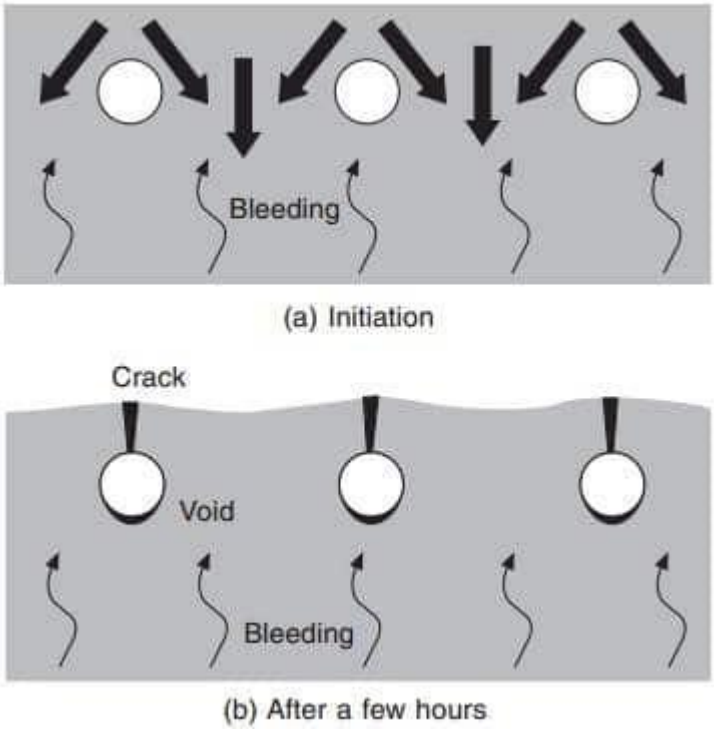
HORMIGÓN FRESCO
Asentamiento plástico

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- El hormigón desciende en las zonas entre barras y se fisura en coincidencia con ellas

  Un revibrado a tiempo puede eliminar el problema

- Es más frecuente en el caso de hormigones de consistencia muy plástica o muy fluida. Poco habitual en pavmentación



HORMIGÓN ENDURECIDO

Resistencia a la compresión, flexión, desgaste

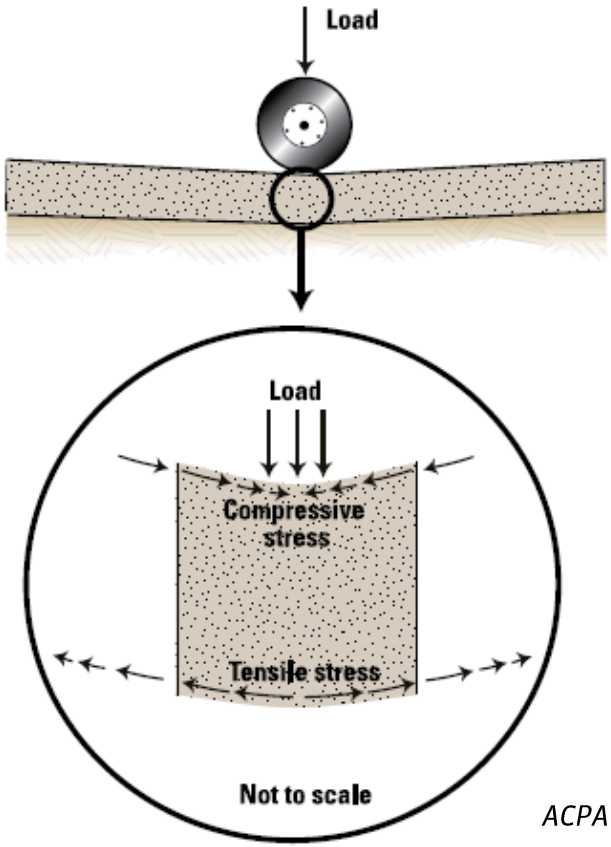
Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- La resistencia mecánica es un parámetro importante ya que, junto con el espesor, **define la capacidad portante del pavimento**.

- Depende de **distintos factores**, tales como: la relación a/c, del conjunto de materiales, de la compactación, del curado, y está influenciada por la calidad de los ensayos.

- **Módulo de elasticidad del hormigón**:

Alta rigidez	→	Menor deformabilidad
Baja rigidez		Riesgo de fisuración

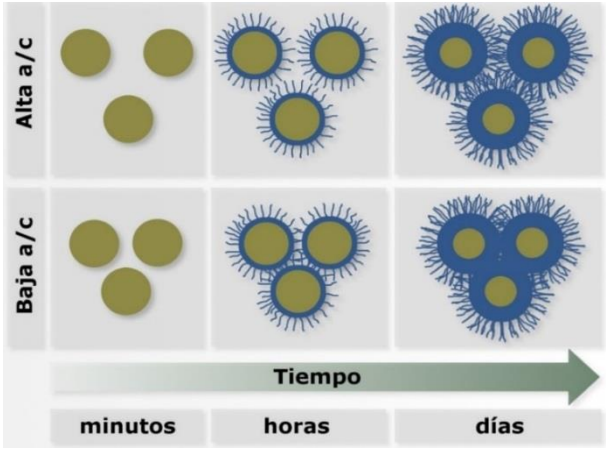


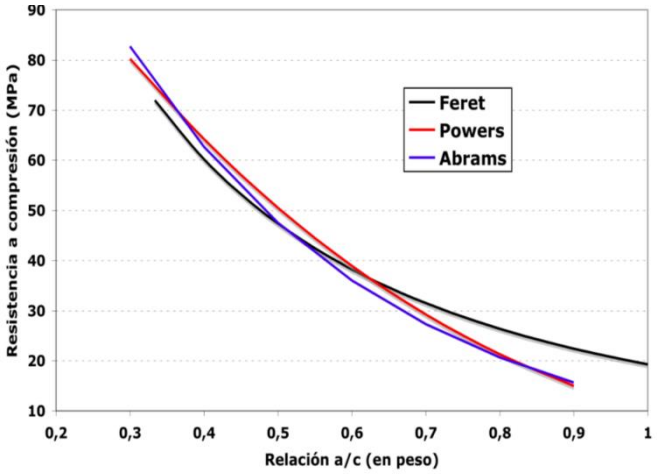
ACPA

HORMIGÓN ENDURECIDO
Resistencia a la compresión

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

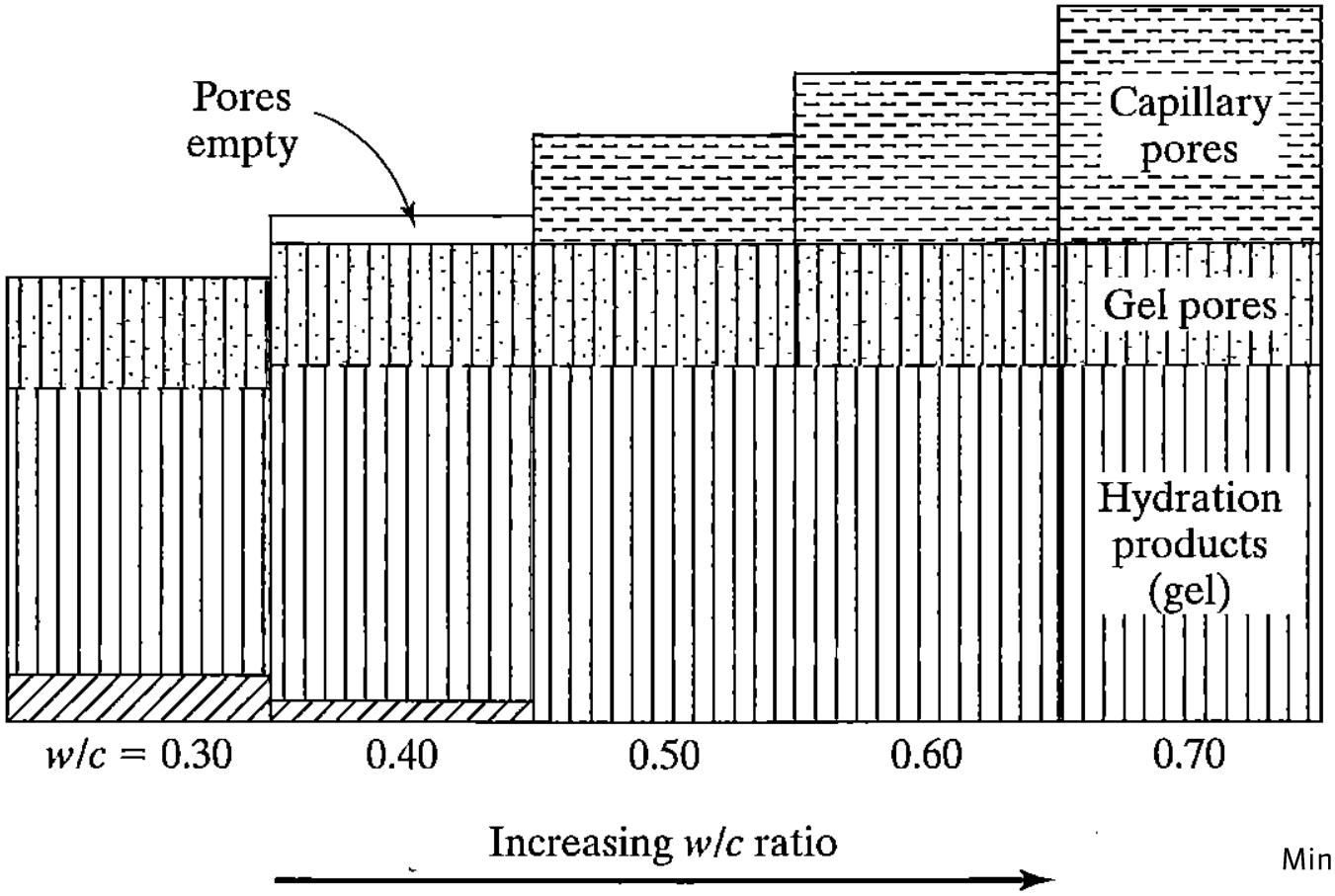
- Resistencia del compuesto: basada en la propia de los materiales, y el enlace / unión entre ellos
- Relación directa con la porosidad (a/c)
- Otros factores a tener en cuenta:
  - Resistencia intrínseca del cemento
  - Cantidad de aire incorporado
  - Velocidad de reacción (hidratación)
  - Fase agregado: resistencia, TM
  - Interfase: textura del AG, TM, a/c, composición del cto, polvo en AG
  - Curado





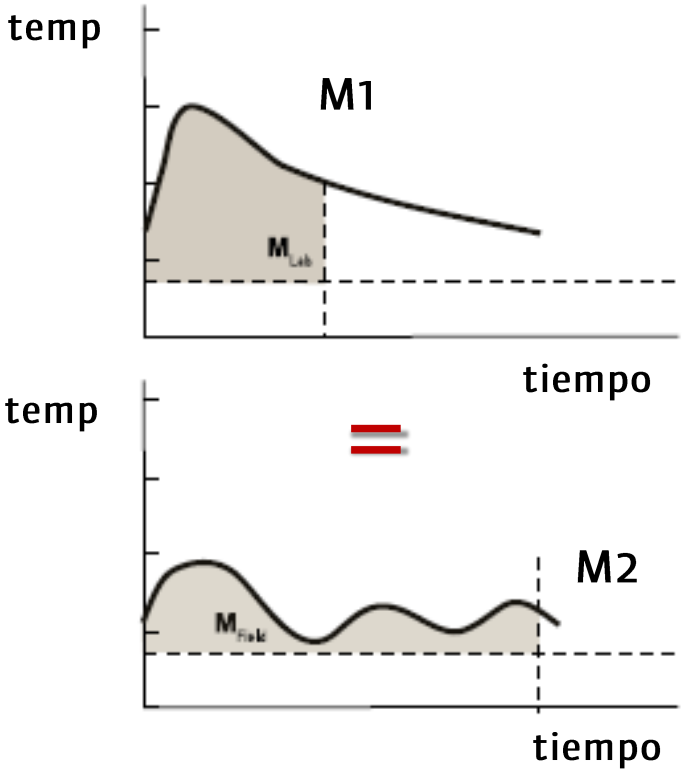
HORMIGÓN ENDURECIDO
Influencia de a/c en la porosidad

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

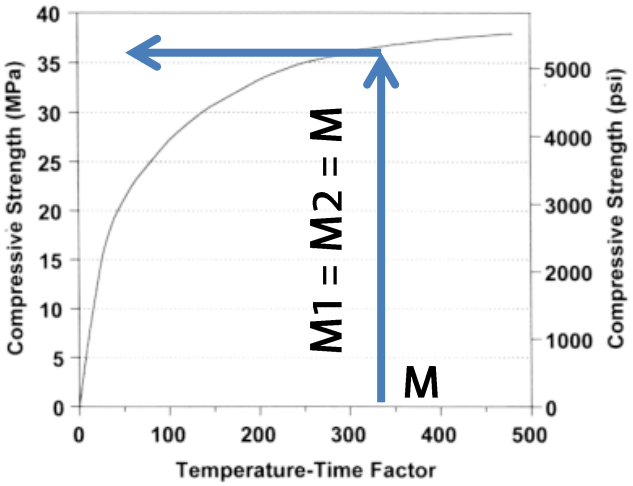


Mindess

HORMIGÓN ENDURECIDO
Madurez



$$M = \sum [(T + 10)] \, . \, tiempo$$



Aplicación útil para:

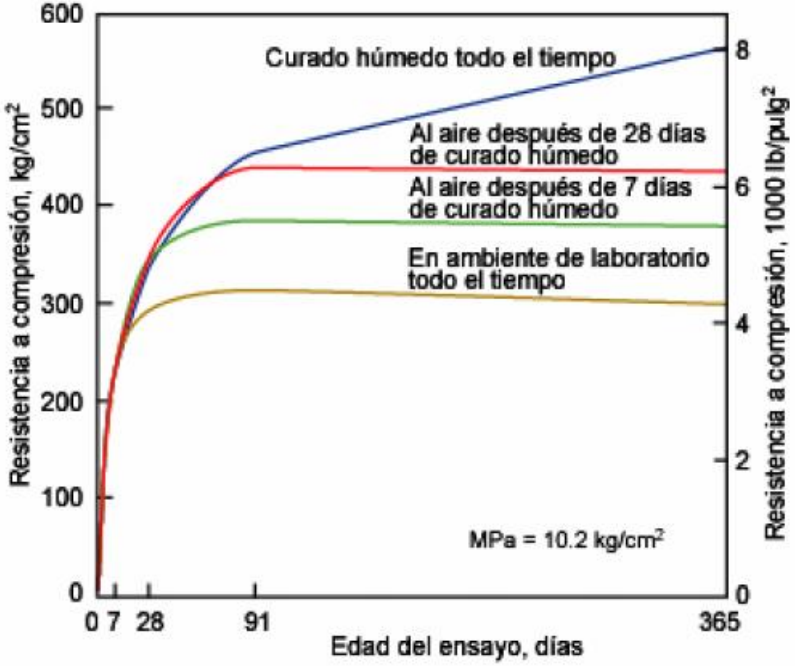
- Momento de aserrado del hormigón de calzada
- Apertura al tráfico vehicular
- Tiempos de desmolde del hormigón
- Momento de retiro de moldes en estructuras generales, o aplicación de postensado en estructuras de H°Post°
- Control desarrollo de hormigones masivos o colocados en clima frío

HORMIGÓN ENDURECIDO
Curado

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Cuanto más temprano, mejor!!

- Prevenir fisuración plástica
- Contribuir con una rápida maduración
- Prevenir alabeo de losas por gradientes térmicos y de humedad
- Evitar el secado prematuro
- Favorece el desarrollo de las reacciones de **hidratación**



Portland Cement Association

Prolongar el curado

Usar métodos EFICIENTES y acordes con procesos constructivos

COMPUESTOS LÍQUIDOS FORMADORES DE MEMBRANAS DE CURADO

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Capacidad para formar una película “impermeable” al vapor de agua

Emulsiones acuosas Parafina | Acrílicas | Resinas | Ceras

Disoluciones en solventes especiales o compuestos clorados
Resinas

- No deben reaccionar desfavorablemente con el hormigón
- Pueden aplicarse por pulverizado manual o mecanizado
- Temprana aplicación

COMPUESTOS LÍQUIDOS FORMADORES DE MEMBRANAS DE CURADO

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- **Capacidad de retención de agua (IRAM 1673):** parámetro más importante para evaluar el desempeño
- **Pigmentado con color blanco**
- **Validar su efectividad en campo**
- **Ver** compatibilidad con temperaturas de trabajo
- **Aplicación homogénea** y en **dosis** adecuadas (de 200 a 300 g/m^2)
- **Prehomogeneizar la carga** antes de la aplicación (especialmente, los de base acuosa)
- **Acotar y controlar el tiempo de acopio**
- **VOCs**

HORMIGÓN ENDURECIDO
Contracción por secado

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

› Pérdida del agua, especialmente de poros de gel

› Relevante en pavimentos, por su geometría

› Algunas medidas de control:

- Reducir volumen de pasta
- Propender a reducir CUA, CUC y a/c. Ajustar consistencia con adit red de agua
- Evitar cementos muy finos y de alta reactividad
- Optimizar granulometría agregado total
- Seleccionar agregados de › E
- Uso de aditivos reductores de la contracción por secado

HORMIGÓN ENDURECIDO
Contracción térmica

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

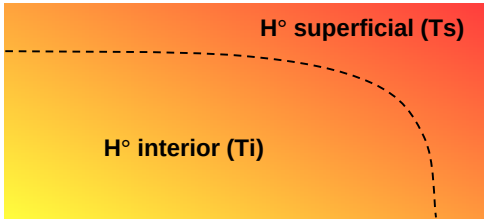
SITUACION DIURNA
(con asoleamiento)

SITUACION NOCTURNA
(o sin asoleamiento)

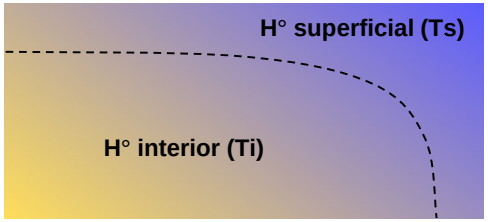
Cambio volumétrico

ΔT

$CET_{h°}$



Ts > Ti



Ti > Ts

- **Marcas de origen térmico,** por gradientes:
  - Día: Asoleamiento + calor de hidratación
  - Noche: Brusco enfriamiento del hormigón en la noche
- **Hormigón superficial** tiene mayor madurez, mayor módulo de elasticidad y menor extensibilidad

HORMIGÓN ENDURECIDO
Reacción Álcali-Sílice (RAS)

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

¿Qué sucede?

Reacción entre $(OH)^-$ y ciertas especies minerales potencialmente reactivas presentes en agregados silíceos

- **Agregados reactivos**
- Compuestos silíceos amorfos
- Álcalis en cantidad suficiente
- Humedad (> 60%)
- Permeabilidad de la pasta y la interfase
- Temperatura y tiempo
- Porosidad del agregado

Producto de reacción: gel interior o en la periferia del agregado, absorbe agua y se expande

Típicamente, fisuración en forma de "mapeo"

¿Cómo lo prevenimos?

- Metodología de análisis previa, más:
  - ✓ Medidas **prescriptivas**, y/o
  - ✓ Medidas **prestacionales**

HORMIGÓN ENDURECIDO
Reacción Álcali-Sílice (RAS)

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Método de ensayo		Aplicable para evaluar agregados		Edad de evaluación	Límite máximo de expansión (%)
		Afectados por	Potencialmente reactivos debido a la presencia de		
IRAM 1674		RAS	Ver excepciones	16 días	0,10
IRAM 1700	60 °C	RAS y/o RAC	Ópalo, calcedonia, vidrio volcánico, tridimita, cristobalita, dolomita (RAC)	13 semanas	0,04
			Cuarzo tensionado y/o microcristalino		0,08
	38 °C	RAS y/o RAC	Sin restricciones	52 semanas	0,04

IRAM 1531.2016

Cantos rodados silíceos del río Uruguay y agregados ígneos, metamórficos o sedimentarios (granitos, granodioritas, gneises, areniscas) que deben su reactividad al cuarzo tensionado deben ser evaluados mediante el ensayo de la IRAM 1700 (convencional o acelerado)

HORMIGÓN ENDURECIDO
Reacción Álcali-Sílice (RAS)

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Prescriptivas

1. Cemento RRAA, s/ IRAM 50001
2. Limitar contenido de álcalis en el hormigón según el nivel de prevención que corresponda
3. Cemento de uso general (s/ IRAM 50000) que contenga AMA en cantidad adecuada (tablas)
4. Hormigón que AMAs en cantidades que sean conformes con la IRAM 50000 y con los mínimos de tablas para prevenir RAS
5. Para el caso E (++severo), usar AMAs y hormigón con bajo contenido de álcalis

Prestacionales
(con evaluación previa documentada)

1. Cemento que cumpla la IRAM 50000 o IRAM 5000+50002 que haya demostrado comportamiento satisfactorio con los agregados en evaluación (experiencia previa docum)
2. Cemento + AMA que hayan demostrado tener un comportamiento efectivo para prevenir la RAS
3. Usar inhibidores químicos
4. Cambiar el agregado, parcial o totalmente, por otro agregado no reactivo

Evaluación de la efectividad inhibidora: con IRAM 1700 (<0,040% a 104 semanas –para los casos 1 a 3-, a 52 semanas para el caso 4)), o con IRAM 1674 (<0,10% a 16 d)

HORMIGÓN ENDURECIDO
Congelamiento y Deshielo (C-D)

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

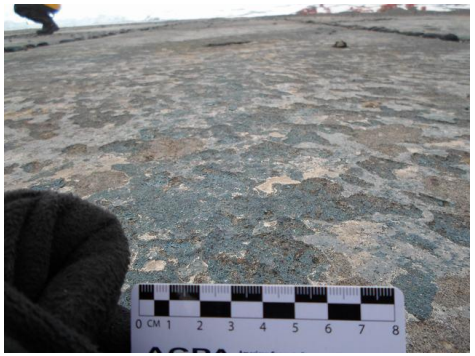
¿Qué sucede?

Agua + acción cíclica de congelamiento (temperatura de congelamiento)

- Grado de saturación de la pasta
- Factor de espaciamiento
- Temperatura en la masa de hormigón
- Comportamiento cíclico (>200-300)
- Resistencia al congelamiento de agregados

> Fisuración por restricción a la expansión de agua congelada

> Usualmente, fisuración paralela a la superficie



HORMIGONES CONVENCIONALES PARA PAVIMENTOS URBANOS

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- **Resistencia a la compresión:** ~ H30
- **Resistencia tracción x flexión**: ~ 4,0 a 4,5 MPa
- **a/c** ~ 0,40 - 0,55
- **Asentamiento:** 7-10 cm (molde y regla)
- **Exudación:** ajustar según caso
- **Contenido de aire:** sin incorporador, excepto C-D

HORMIGONES TAR
Características

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- Empleados en condiciones de **alta productividad** requerida
- Supone un elevado consumo de materias primas, con un alto nivel de uniformidad
- **Hormigones de consistencia seca** (As = 2-4 cm). Aprovechan alta densificación lograda por TAR

Directrices sobre dosificación:

- Contenidos moderados de material cementicio (CUC < 350 kg/m^3)
- Ligero mayor contenido de agregados (MF AgTotal ~ 5,5 a 6,0; AF ~ 36-40 %)
- a/c ~ 0,40
- Resistencia tracción por flexión: ~ 4,5 MPa
- Capacidad de exudación: 1-3 % -tip-
- CET Hormigón ≤ 10,5 . 10-6 (1/°C)

DIRECTRICES DE DISEÑO DE HORMIGONES PARA PAVIMENTOS

- **Evitar** empleo de **hormigones de elevada resistencia**.
- **Optimizar granulometría de agregados,** minimizando el C.U.A. y C.U.C.
- **Evitar agregados con polvo adherido**.
- **Si es posible, utilizar agregados saturados** (+ importante en agregados de elevada absorción y en clima caluroso).
- Especialmente en TAR, previo a su utilización en un proyecto, **evaluar las características de los agregados** y/o del hormigón elaborado con los mismos (CET, E, MR, etc.).

HORMIGONES ESPECIALES
FAST-TRACK

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- Empleados especialmente en **obras de reparación** o cuando se requiere una **muy rápida habilitación al tránsito**

- **Alta resistencia inicial**, tanto a compresión como flexión

- Permiten una pronta habitación al tránsito (Por ej. 24 h, 48 h)

- **Estrategias (una o varias)**
  1. Seleccionar un material cementicio de mayor reactividad (finura, composición, aditivos)
  2. Incrementar el contenido de cemento, y reducir a/c (a/c ~ 0,37 - 0,40), compensando consistencia con reductores de agua
  3. Curado y protección térmica intensiva
  4. Uso de acelerantes de fraguado y endurecimiento)→ No a base de cloruro de calcio

HORMIGONES ESPECIALES
Hormigones Coloreados

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

Pigmentos

- Según norma **ASTM C979**
- Requieren control riguroso para su suministro y combinación
- Ajustar dosis según tipo de productos, dosificación, color de los demás materiales, y color deseado.

Color	Tipo de pigmento	Dosis de referencia (%)
Rojo	Óxido de hierro (hematita)	5
Amarillo	Óxido de hierro	5
Verde	Óxido de cromo	6
Azul	Ftalocianinas	0.7
	Óxido de cobalto	5
Negro	Óxido de hierro	5
	Negro de humo	2

(Dosis expresadas respecto a la masa de cemento)

HORMIGONES ESPECIALES
Hormigones Reforzados con fibras (HRF)

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

El uso de fibras en el hormigón puede contribuir a:

- Mejorar resistencia mecánica
- Aumentar posibilidad de deformación
- Controlar de fisuración
- Aumentar la tenacidad
- Mejorar la durabilidad

- Fibras disponibles en una **gran variedad** de largos, formas, espesores, y materiales
- No suelen utilizarse intensivamente.
- Pueden ser **estructurales** o **no estructurales**
- De **acero, poliméricas u otros materiales**
- **Cuidado con la formación de erizos**

HORMIGONES ESPECIALES
Hormigones Reforzados con fibras (HRF)

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

FIBRAS DE ACERO

- **Tipos**: trefiladas, cortadas en láminas, rascado en caliente, fundidas, entre otros
- **Objetivo: mejorar prestaciones del hormigón endurecido**:
  - Mayor resistencia a la tracción por flexión (+ 150%)
  - Menor tendencia a la fisuración
  - Mayor resistencia a la fatiga

- **Normas de especificación**: UNE 83500-1, ASTM A820
- Dosis: **20 kg/m^3 – 100 kg/m^3** (30 kg/m^3)
- **Largo mínimo**: 1,5 a 2,0 TMA del AG
- **Relación de aspecto** $\geq$ 50
- Para hormigón bombeado, largo < 2/3 Diámetro de la cañería

HORMIGONES ESPECIALES
Hormigones Reforzados con fibras (HRF)

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

FIBRAS POLIMÉRICAS

- Pueden ser de uso **estructural** y **no estructural.**
- De polipropileno, polietileno de alta densidad, aramdia, nylon, poliéster, entre otras.
- **Microfibras:** contribuyen a minimizar la fisuración por contracción plástica (Diámetro menor que 0,30 mm)
- **Macrofibras estructurales**: aportan cierta capacidad residual resistente (Diámetro mayor que 0,30 mm)
- Dosis: de **2 a 9 kg/m^3** (4 kg/m^3)
- Para **macrofibras estructurales**, largo: al menos, 2 a 3 veces el TMA
- **Normas de especificación:** UNE 83500-2, ASTM C1116

HORMIGONES ESPECIALES
Hormigones Compactados a Rodillo (RDC)

Líderes en Innovación y Transferencia Tecnológica

- No se aserran las juntas ni se colocan pasadores
- No usados en vías de media y alta velocidad (> 45 km/h)
- **Directrices sobre diseño del hormigón:**
    - Humedad de la mezcla: ~ 7 - 8 %
    - CUC: 80 a 160 kg/m^3
    - ~ 85% del volumen ocupado por agregados
    - Menor cantidad de pasta (~ 30 %), y agua de mezclado (~ 40 %)
    - Consistencia muy seca (T_{VEBE} = ~ 30 s)
    - Propiedades mecánicas similares ….. 25 a 30 MPa a 5 d (comp)
    - Menores contracción por secado y tendencia a la fisuración
    - Curado es clave!!

Consultas?

Ing. Matías Polzinetti
matias.polzinetti@icpa.org.ar
San Martín 1137 | 1° Piso
Ciudad Autónoma de Buenos Aires | Argentina
Teléfono: (+54 11) 4576 7695 / 7690 | www.icpa.org.ar