



Antecedentes Generales





INDICE

DEFINICIÓN DE HORMIGÓN	4
• CONCEPTO GENERAL:.....	4
• CONCEPTO PARTICULAR:	4
• DEFINICION CUBRE RANGO AMPLIO DE PRODUCTOS	4
ANTECEDENTES HISTORICOS.....	5
• 1ª ETAPA: EVOLUCIÓN AGLOMERANTES	5
• 2ª ETAPA: TECNOLOGÍA DEL HORMIGÓN Y DESARROLLO MÉTODOS CONSTRUCTIVOS.....	6
INNOVACION TECNOLOGICA.....	8
• DESAFÍO TECNOLÓGICO DE LA CONSTRUCCIÓN	8
• PROCESO DE TRANSFORMACIÓN O CAMBIOS.....	9
• VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL HORMIGÓN.....	10
➤ Ventajas	10
➤ Desventajas	10
• CONSUMO CEMENTO Y PRODUCTOS ANEXOS	11
CARACTERISTICAS GENERALES DEL HORMIGON	14
• CONSTITUYENTES Y FUNCIÓN.....	14
• MICROESTRUCTURA Y DESARROLLO DE LA HIDRATACIÓN	16
• RELACIÓN ENTRE LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN	17
• MACROESTRUCTURA.....	18
• MATERIAL COMPUESTO.....	19
• PAPEL DE LAS INTERFASES.....	20
• SISTEMA DE FABRICACIÓN	22
• DURABILIDAD DEL HORMIGÓN.....	23
➤ Agrietamiento del Hormigón.....	23
➤ Problemas más Frecuentes del Hormigón	24
➤ Causas más Frecuentes de los Problemas del Hormigón.....	25
➤ Causas de Agrietamiento	27
• FACTORES QUE AFECTAN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN..	28
• RESPONSABILIDAD INDIVIDUAL.....	29
• ¿QUÉ ES UN BUEN HORMIGÓN?	30



REQUISITOS GENERALES	31
• EN ESTADO FRESCO: TRABAJABILIDAD.....	31
• EN ESTADO ENDURECIDO	31
CLASIFICACIONES DEL HORMIGÓN.....	32
• SEGÚN RESISTENCIA A COMPRESIÓN	32
• SEGÚN PRESENCIA ARMADURAS.....	32
• SEGÚN DENSIDAD APARENTE.....	32
• OTROS.....	32
RAZÓN W/C - LEY DE ABRAMS	33



DEFINICIÓN DE HORMIGÓN

- **CONCEPTO GENERAL:**

Todo producto o masa fabricado con un medio cementante

- **CONCEPTO PARTICULAR:**

Material de construcción compuesto por mezcla homogénea de materiales pétreos inertes y cemento hidráulico:

	<u>% en Volumen</u>
⇒ Aglomerante (cemento hidráulico)	10 - 15%
⇒ Áridos granulares	65 - 75%
⇒ Agua	15 - 20%
⇒ Aire ocluido	1 - 2%
⇒ Aditivos y Adiciones (eventuales)	% variable

- **DEFINICION CUBRE RANGO AMPLIO DE PRODUCTOS**

⇒ Diferentes tipos de cemento

⇒ Adiciones:

puzolana, ceniza volante, escoria de alto horno, polímeros, fibras, etc

⇒ Variables de fabricación:

calentado, curado al vapor, autoclave, al vacío, vibrado, extruido, proyectado, etc.



ANTECEDENTES HISTORICOS

• 1ª ETAPA: Evolución Aglomerantes

Antigüedad (7000 a.C.) → Siglo XIX

⇒ **1^{er} aglomerante: Arcilla** → Construcciones babilonias y asirias
(unión de bloques)

⇒ **2^o aglomerante: Yeso** → Pirámides egipcias

calcinación mojado



⇒ **3^{er} Aglomerante: Cales grasas** → Construcciones griegas

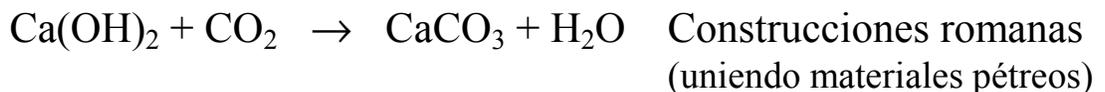
Proceso calcinación (1.000 °C)



Proceso hidratación



Proceso carbonatación



Caliza + Ceniza volcánica (sílice y alúmina) → **Cemento**

Reglas de Vitruvio - Uso de puzolana

⇒ **4^o aglomerante: Cal hidráulica y Cemento Portland**

- Experiencias John Smeaton (1756), Vicat (1818)
- Patente : Joseph Aspdin (1824)
- Fabricación industrial: Isaac Johnson (1845), estudio proceso clinkerización
- Desarrollo Cemento Portland
- Desarrollo Cementos Puzolánicos



- **2ª ETAPA: Tecnología del Hormigón y Desarrollo Métodos Constructivos**

➔ **Tecnología del Hormigón : INVESTIGACIÓN**

- De Preaudeau: Compacidad de arenas según granulometría
- Alexandre: Agua mojado arenas
Influencia temperatura en fraguado pasta
- Férét: Compacidad áridos combinados
Agua mojado arenas
Resistencia de morteros → $R = f(W/C)$
- Ros: $R_t = f(t)$
- Abrams: Módulo de finura
Medición trabajabilidad hormigones
Resistencia → $R = f(W/C)$
- Bolomey: $R = f(C/W)$
- Faury, Hughes, etc.: Métodos de dosificación granulométricos
- Teychenne, Franklin y Erntroy: Dosificación hormigón
- Goto, Lutz y Gergely, etc.: Adherencia acero – hormigón
- Houghton, etc.: Hormigón masivo
- Freyssinet, etc.: Hormigón pretensado
- Vetter, Hughes, Base, Harrison, etc.: Fisuración hormigón
- Beeby, etc.: Corrosión hormigón armado
- Bazant, Gardner, Sakata, Hobbs, etc.: Retracción y creep



→ Métodos Constructivos

◆ **Hormigón Armado :**

Lambot (1850): primera aplicación en construcción bote
Wayss (1887): primer texto sobre H.A.
Fisuración y rotura del hormigón
Barras resistentes a corrosión

◆ **Hormigón en grandes masas:**

Construcción Grandes Presas EE.UU. (1930)
Estudios del Bureau of Reclamation
Problemas térmicos del hormigón
Sistemas de análisis por método elementos finitos
Desarrollo hormigón rodillado

◆ **Hormigones pre y post-tensados:**

Puentes de grandes luces (Freysinot)
Comportamiento elasto-plástico del hormigón
Desarrollo hormigones de alta resistencia

◆ **Hormigón para caminos:**

Uso hormigones baja fluidez y buena calidad superficial
Uso aditivos incorporadores de aire
Desarrollo equipos de construcción
Desarrollo hormigón Fast Track
Hormigones con fibras y drenantes (sin finos)

◆ **Hormigón para obras hidráulicas de gran capacidad :**

Procesos de erosión y cavitación

◆ **Hormigones Especiales:**

- Hormigones livianos
- Hormigón proyectado
- Cementos expansivos
- Ferrocemento
- Hormigones de baja resistencia
- Hormigones anti wash-out
- Hormigones con materiales sintéticos: resinas – polímeros
- Hormigones pesados
- Hormigones pre-packed
- Hormigón con fibras
- Hormigón con color
- Hormigones autonivelantes



INNOVACION TECNOLOGICA

- **DESAFÍO TECNOLÓGICO DE LA CONSTRUCCIÓN**

COMPETITIVIDAD

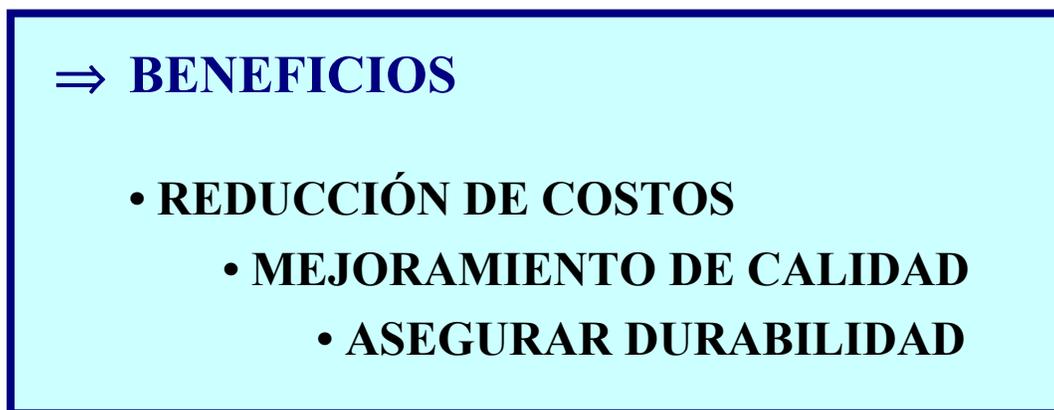
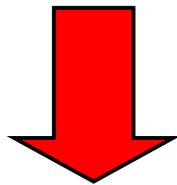
- **CALIDAD**
- **COSTO**
- **PLAZO**

⇒ **CONCEPTOS DE:**

- CALIDAD TOTAL
- MEJORAMIENTO CONTINUO
- CONSTRUCTABILIDAD
- PRODUCTIVIDAD
- JUSTO A TIEMPO
- CONSTRUCCIÓN SIN PÉRDIDAS
- BENCHMARKING
- RE-INGENIERÍA
- INDUSTRIALIZACIÓN
(Prefabricación, pre-ensamblaje y modularización)



- **PROCESO DE TRANSFORMACIÓN O CAMBIOS**



!!! Know How !!!
Clave del Éxito

- TRANSFERENCIA, ADAPTACIÓN Y DESARROLLO DE TECNOLOGÍA
- EVALUACIÓN TÉCNICO - ECONÓMICA DE LAS SOLUCIONES



• **VENTAJAS Y DESVENTAJAS DEL HORMIGÓN**

➤ **Ventajas**

- ✓ Fragua, endurece y adquiere resistencia
- ✓ Versatilidad
- ✓ Plasticidad
- ✓ No necesita calor para su fabricación
- ✓ Continuidad
- ✓ Buena durabilidad
- ✓ Resistente al fuego (400°C) y a la radiación nuclear
- ✓ Materiales componentes fáciles de encontrar
- ✓ Adherencia acero - hormigón
- ✓ Coeficiente de dilatación similar al del acero
- ✓ Protege al acero de corrosión y fuego
- ✓ Variadas terminaciones superficiales, relieves y colores
- ✓ Diferentes métodos de construcción
- ✓ Reparación y adaptación

➤ **Desventajas**

- Baja resistencia a la tracción
- Inestabilidad dimensional
- Fabricación en terreno (puede afectar variabilidad del hormigón y estabilidad de sus propiedades)
- Material heterogéneo a todo nivel de observación
- Anisotrópico cuando hay armaduras
- Propiedades dependen del tiempo



• CONSUMO CEMENTO Y PRODUCTOS ANEXOS

La industria del cemento produce uno de los insumos más importantes del sector construcción y a través de su principal derivado el hormigón, provee el componente fundamental de la infraestructura física necesaria para el desarrollo económico de los sectores productivos del país.

Durante la década del '80 el sector construcción creció a un ritmo de 5,6% anual, cifra muy superior al crecimiento promedio del país que fue de 2,8% anual. A principios de la década este sector representaba el 5,3% del PGB del país y termina en 1990 siendo el 7%.

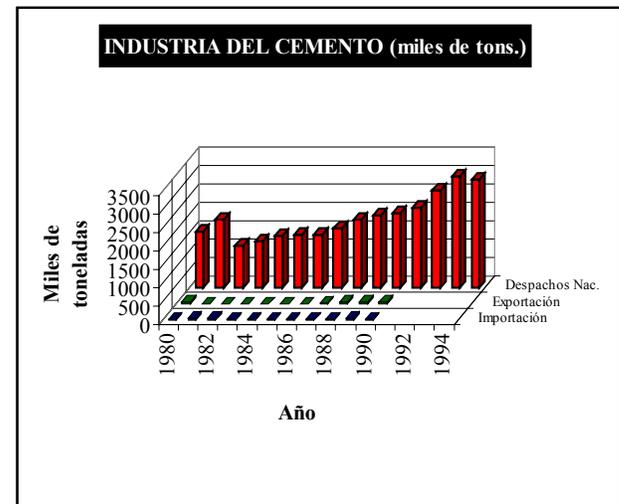
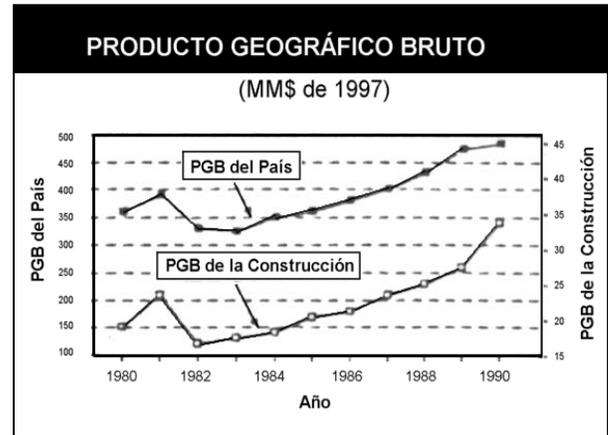
La industria del cemento se ha visto afectada por las crisis de 1982 y 1998 bajando su producción de 1.850.000 toneladas a 1.146.000 toneladas en 1982. A partir de 1983 la recuperación de la producción fue sostenida y alcanzó un ritmo de 7,3% anual. Se estima una baja de 25% en 1999 respecto a 1998.

Importantes inversiones realizadas han aumentado la capacidad instalada de producción, pasando de 1.770.000 toneladas en 1980 a **3.040.000 toneladas/año en 1990**. Desde 1992 se han estado realizando nuevas inversiones en esta industria, por lo que continuamente se aumenta la capacidad de producción.

La Realidad Actual

El consumo en Chile (nacional + importaciones) subió de aproximadamente 2.100.000 a 3.000.000 toneladas anuales entre 1990 y 1994, con un **consumo per cápita que varió de 156 a 223 kg/habitante**, promedio inferior respecto a otros países.

El comercio internacional chileno de este producto, importación-exportación, es bajo, y sumados ambos no alcanzan a representar el 3% de la producción en la década, principalmente porque esta industria ofrece al mercado chileno una variada gama de cementos de buena calidad que satisfacen los



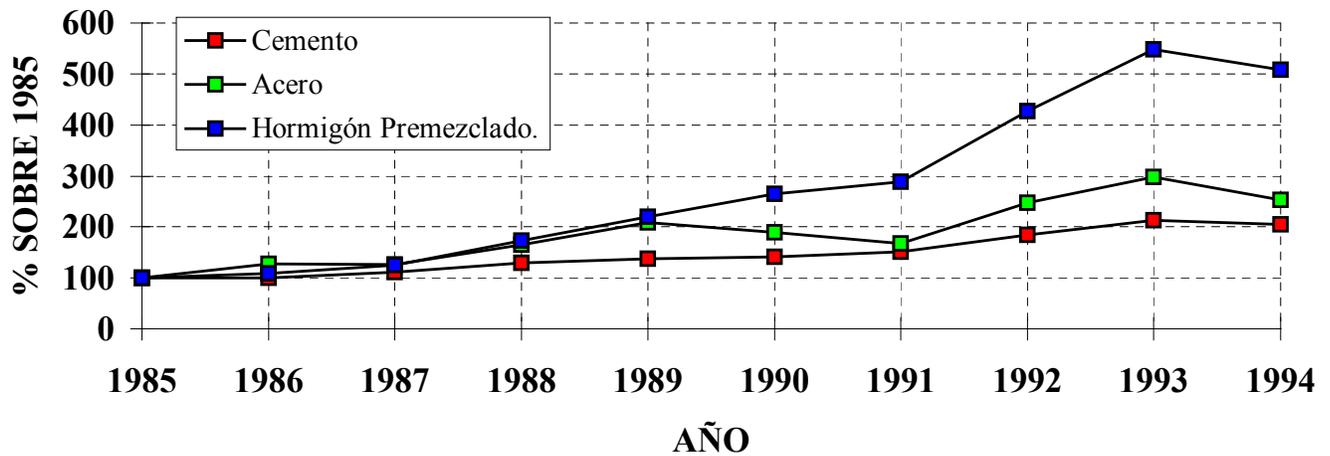
Año	Despachos Nac.	Export.	Import.
1980	1.504,4	62,5	23,4
1981	1.846,5	3,3	42,1
1982	1.145,5	0,0	38,5
1983	1.259,9	0,0	17,2
1984	1.399,9	0,0	15,0
1985	1.424,8	0,0	8,9
1986	1.433,7	2,8	15,0
1987	1.594,2	24,1	8,4
1988	1.838,5	44,1	18,8
1989	1.960,1	47,2	47,7
1990	2.017,1	51,5	32,0
1991	2.161,1		
1992	2.622,0		
1993	3.023,9		
1994	2.915,7		



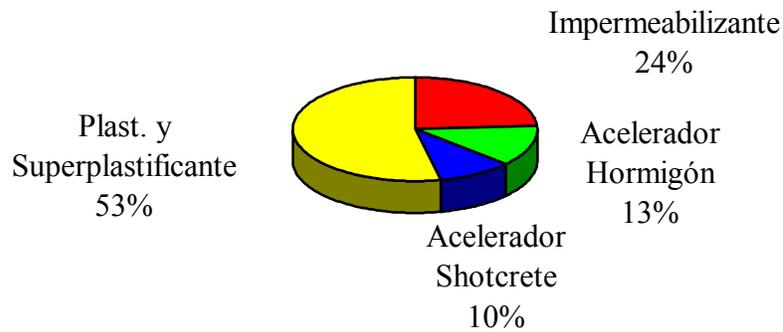
requerimientos de la construcción, y por la barrera natural del costo del transporte.



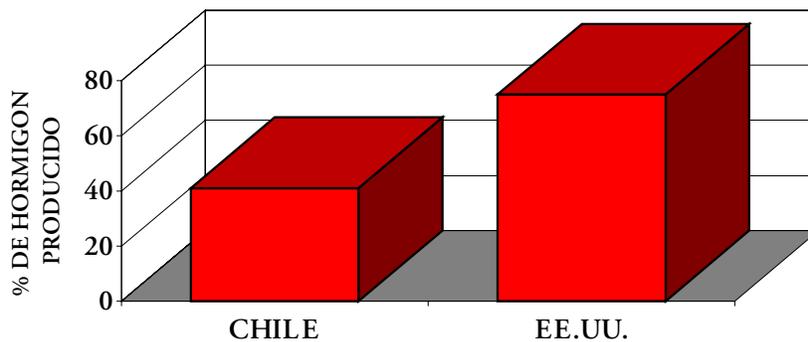
EVOLUCION DE LA VENTA DE PRODUCTOS



PARTICIPACION EN EL MERCADO NACIONAL DE DISTINTOS TIPOS DE ADITIVOS - AÑO 94



PORCENTAJE UTILIZACION ADITIVOS (1994)





CARACTERISTICAS GENERALES DEL HORMIGON

• **CONSTITUYENTES Y FUNCIÓN**

⇒ **AGLOMERANTE (cemento hidráulico)** **10-15%**

Componente activo del hormigón

Funciones principales:

- a) Llenar huecos del árido, aglomerándolo.
En estado fresco pasta lubrica y da cohesión.
Endurecida pasta tapona los huecos del árido dando impermeabilidad
- b) Proporciona resistencia al hormigón endurecido

⇒ **ÁRIDOS GRANULARES (arena + grava)** **60-80%**

- a) Forma esqueleto inerte que da rigidez para resistir acción de cargas, resistir abrasión, clima ==> **Durabilidad**
- b) Mejora estabilidad dimensional al reducir cambios de volumen de la pasta
- c) Economía

⇒ **AGUA** **15-20%**

- a) Confiere plasticidad en estado fresco
- b) Hidrata al aglomerante
- c) Curado del hormigón (ambiente saturado)

⇒ **AIRE OCLUIDO** **1-2%**

⇒ **ADITIVOS (eventuales)**

Materiales activos que modifican propiedades del hormigón por acción física o química

⇒ **ADICIONES (eventuales)**

Materiales sólidos inertes

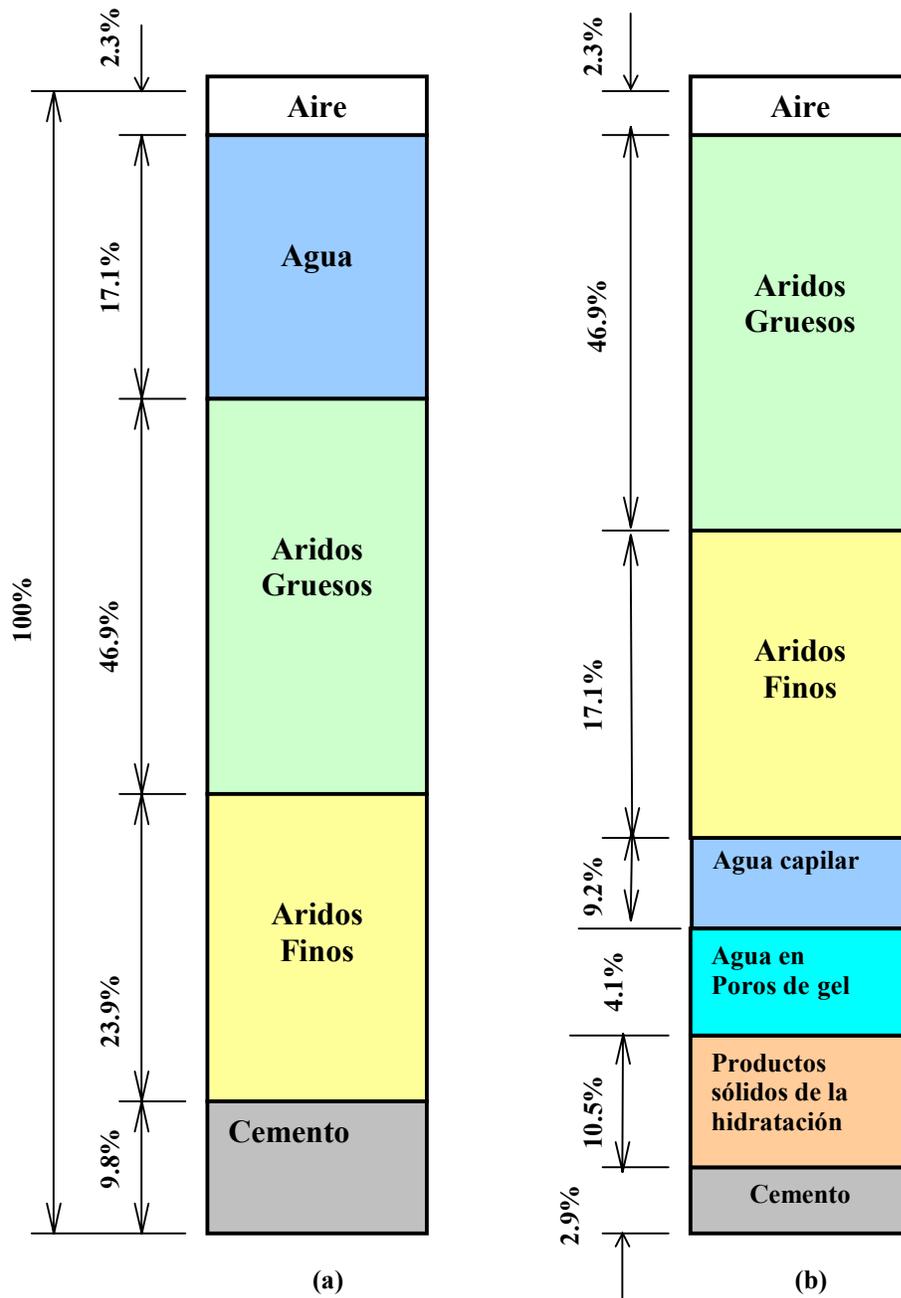


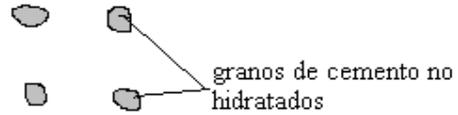
Fig. Proporciones volumétricas del hormigón en una mezcla de proporciones 1:2:4 en peso con razón agua/cemento de 0.55 y aire incorporado de 2.3%:

- (a) Antes de la hidratación, y
- (b) Cuando el grado de hidratación es 0,7.

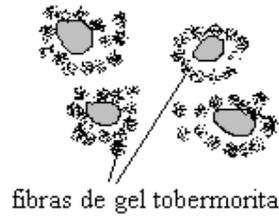


• MICROESTRUCTURA Y DESARROLLO DE LA HIDRATACIÓN

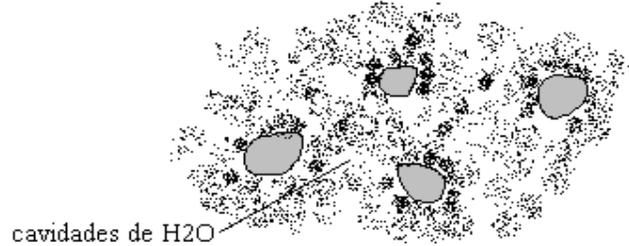
Recién mezclado



Después de 2 horas



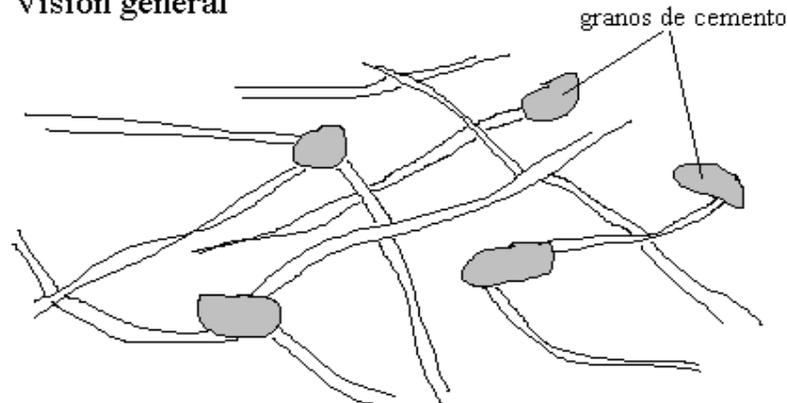
Después de 1 día



Después de 7 días



Visión general





• RELACIÓN ENTRE LOS COMPONENTES DEL HORMIGÓN

⇒ **Productos de hidratación cemento:**

material de construcción esencial

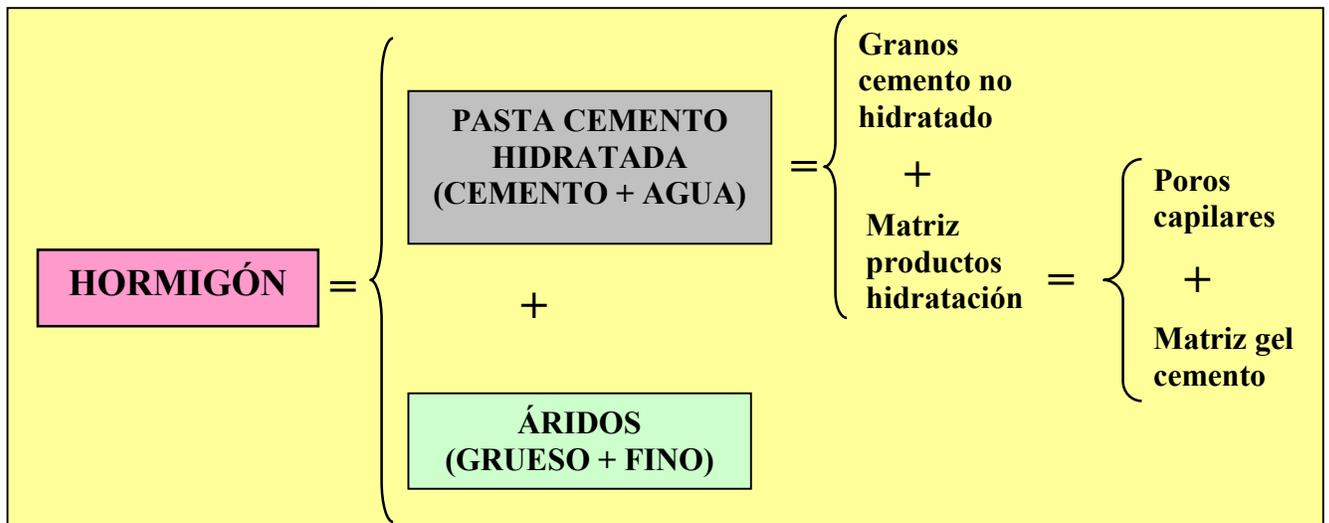
Aridos: papel de diluyente más barato

**INDEPENDIENTEMENTE DEL COSTO,
EL USO DE ÁRIDOS
ES BENEFICIOSO PARA EL HORMIGÓN**

⇒ **Árido grueso:** mini - albañilería

Mortero (cemento hidratado + arena) = material de unión

⇒ **Material compuesto de 2 fases:**



⇒ **PROPIEDADES HORMIGÓN = función de:**

- Propiedades ambas fases
- Cantidades ambas fases
- Interfase



- **MACROESTRUCTURA**

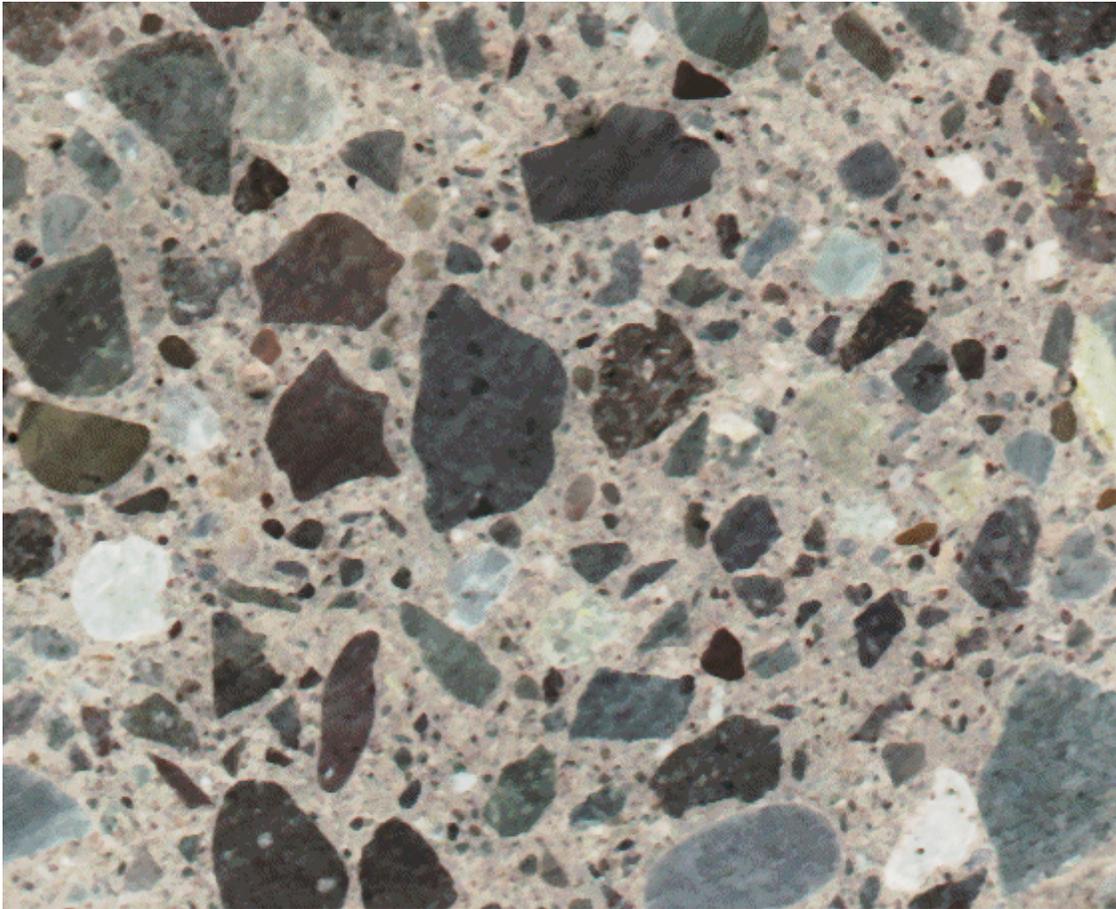


Fig. Macroestructura es la estructura gruesa de un material que es visible por el ojo humano.
En la macroestructura del hormigón se distinguen claramente dos fases: los áridos de varios tamaños y formas, y en medio el cementante, el que consiste en una masa incoherente de pasta de cemento hidratada.



• **MATERIAL COMPUESTO**

⇒ **Formas Fundamentales o Ideales De Materiales Compuestos**

⇒ **DURO:** matriz continua con alto módulo de elasticidad + Partículas embebidas con módulo inferior

⇒ **BLANDO:** Matriz continua de bajo módulo de elasticidad + Partículas elásticas embebidas con alto módulo

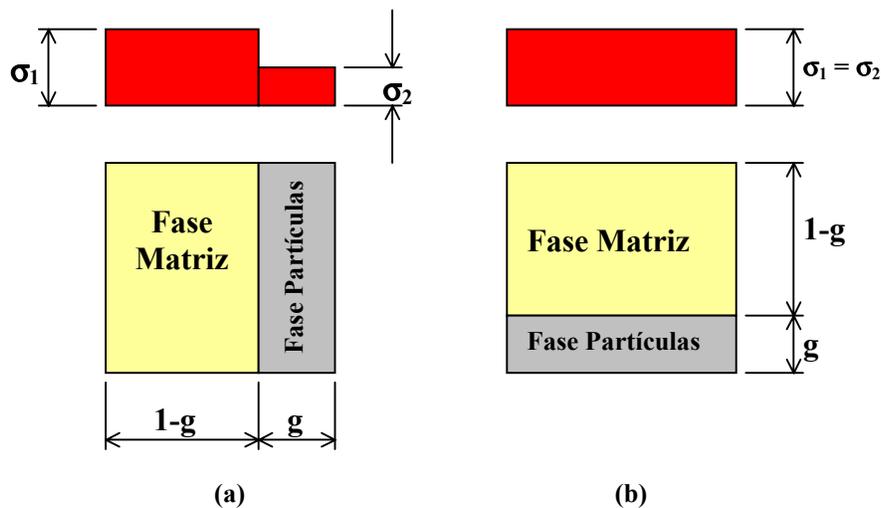


Fig. Modelos para: (a) compuestos duros, (b) compuestos blandos.

$$E = (1 - g)E_m + gE_p \qquad E = \left(\frac{1 - g}{E_m} + \frac{g}{E_p} \right)^{-1}$$

donde: g = % de volumen de partículas
 E_m y E_p = Módulos de elasticidad de la matriz y partículas, respectivamente.

Estos límites no se alcanzan en la práctica y son relativos

Se obtiene una aproximación suponiendo:

MATERIAL COMPUESTO DURO

HORMIGÓN CON ÁRIDOS LIVIANOS

MATERIAL COMPUESTO BLANDO

HORMIGÓN CON ÁRIDOS NORMALES



• PAPEL DE LAS INTERFASES

Volumen hormigón fresco compactado > Volumen áridos compactados
($\approx 3\%$)

Las partículas del árido no están en contacto, sino que están separadas por una capa delgada de pasta de cemento

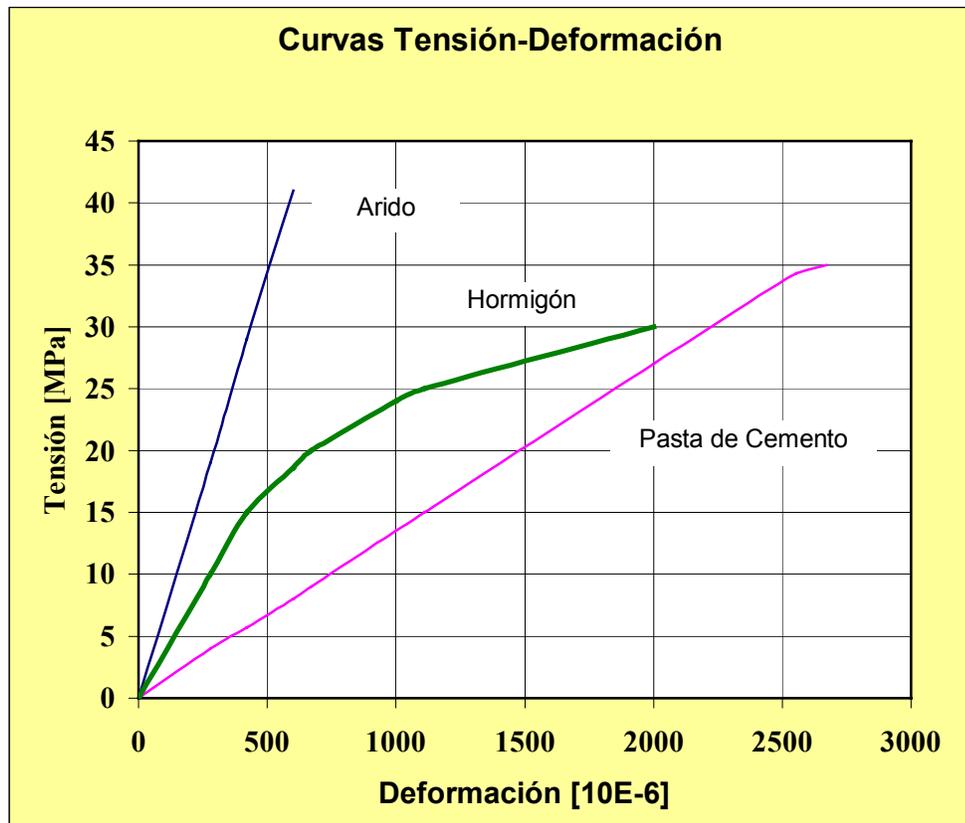


Fig. Curvas Tensión-Deformación para Pasta de Cemento, Arido y Hormigón.

$f_c \text{ árido} > f_c \text{ hormigón}$

$f_c \text{ pasta} > f_c \text{ mortero} > f_c \text{ hormigón}$

LA INTERFASE AFECTA LA CURVA $\sigma - \epsilon$ DEL HORMIGÓN Y PROVOCA EL DESARROLLO DE MICRO AGRIETAMIENTO EN LA INTERFASE



Zona de Transición: consiste en pasta de cemento hidratada, pero con una mayor porosidad y cristales más grandes. Es menos resistente.

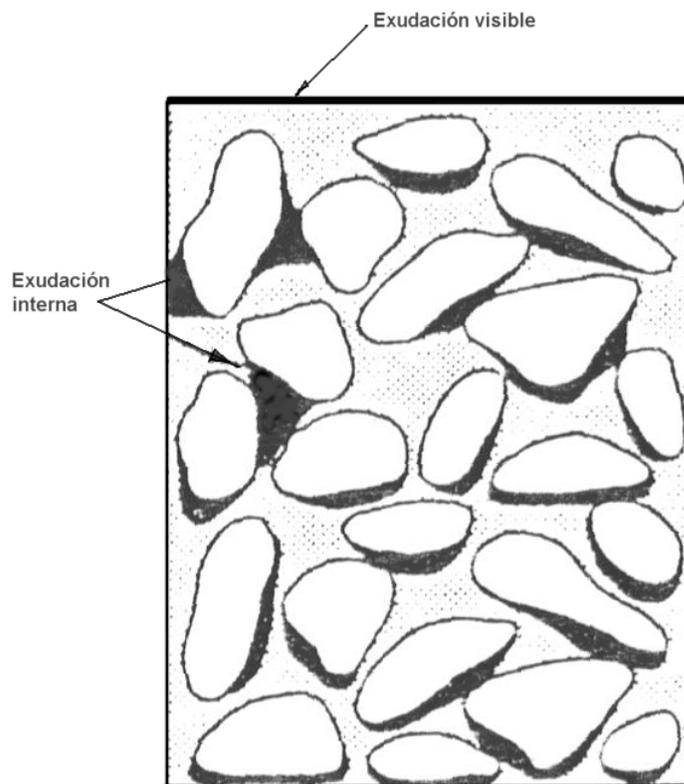


Fig. Diagrama de la Exudación en Hormigón Fresco.

La exudación interna se acumula en la vecindad de los áridos grandes y alargados. Es esos lugares, la zona de transición árido - pasta de cemento tiende a ser débil y propensa a microfisuras.

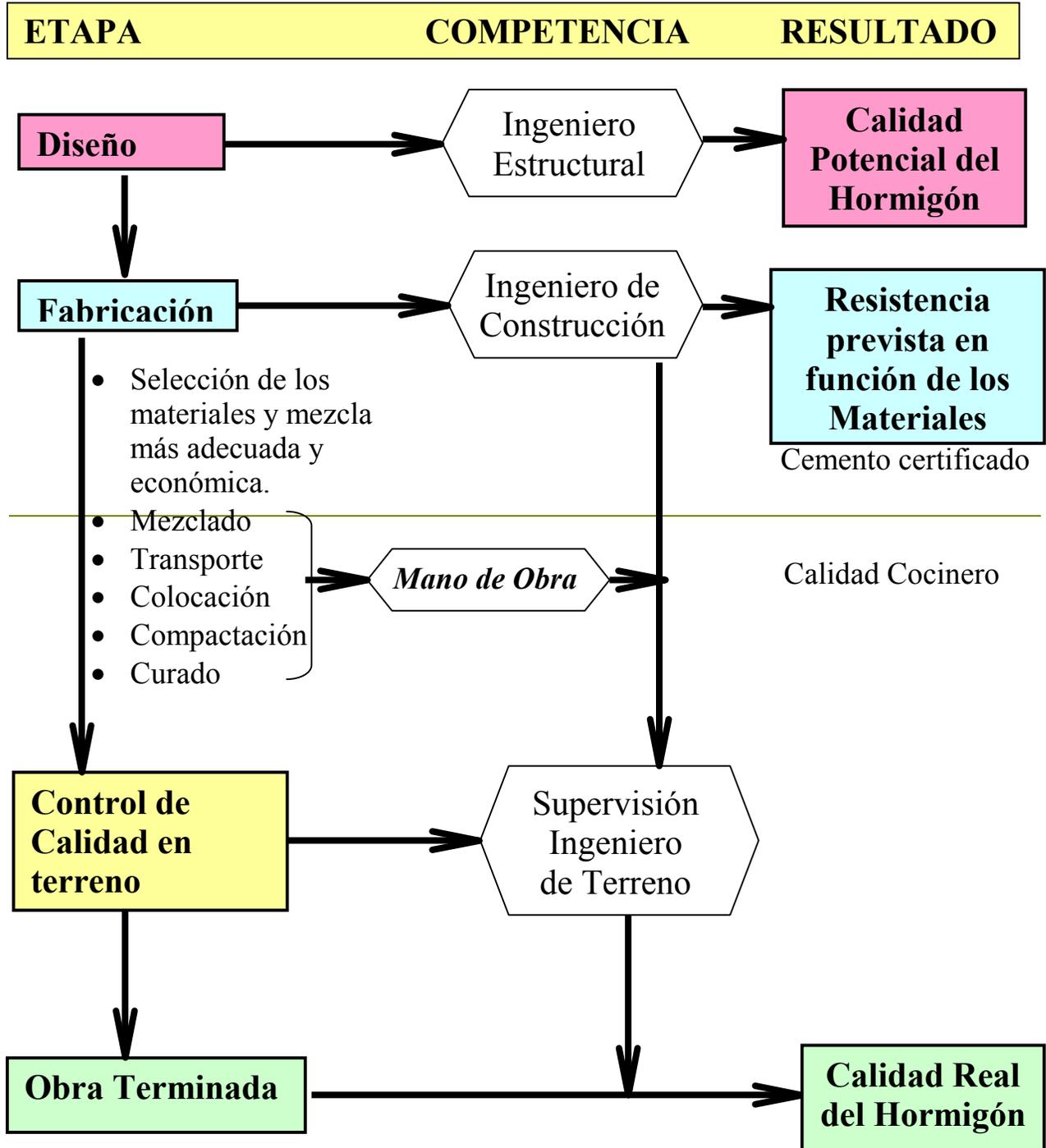


Permeabilidad Hormigón > Permeabilidad Pasta

Resistencia Pasta > Resistencia Mortero > Resistencia Hormigón

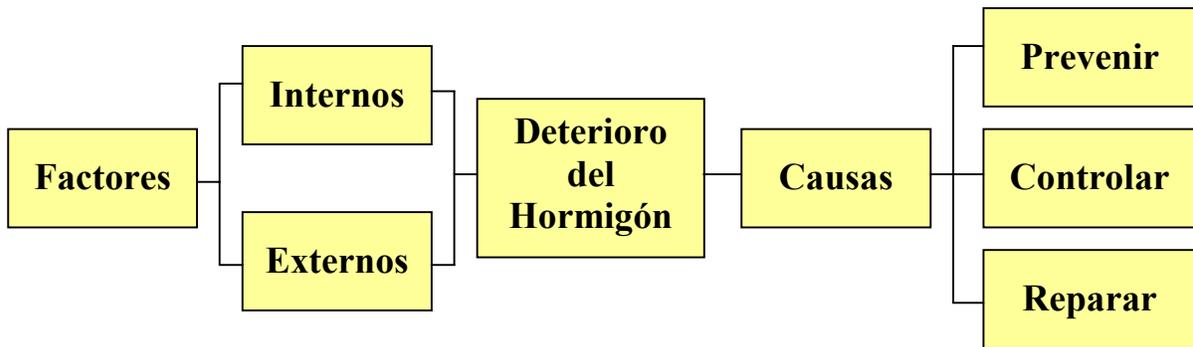


• **SISTEMA DE FABRICACIÓN**

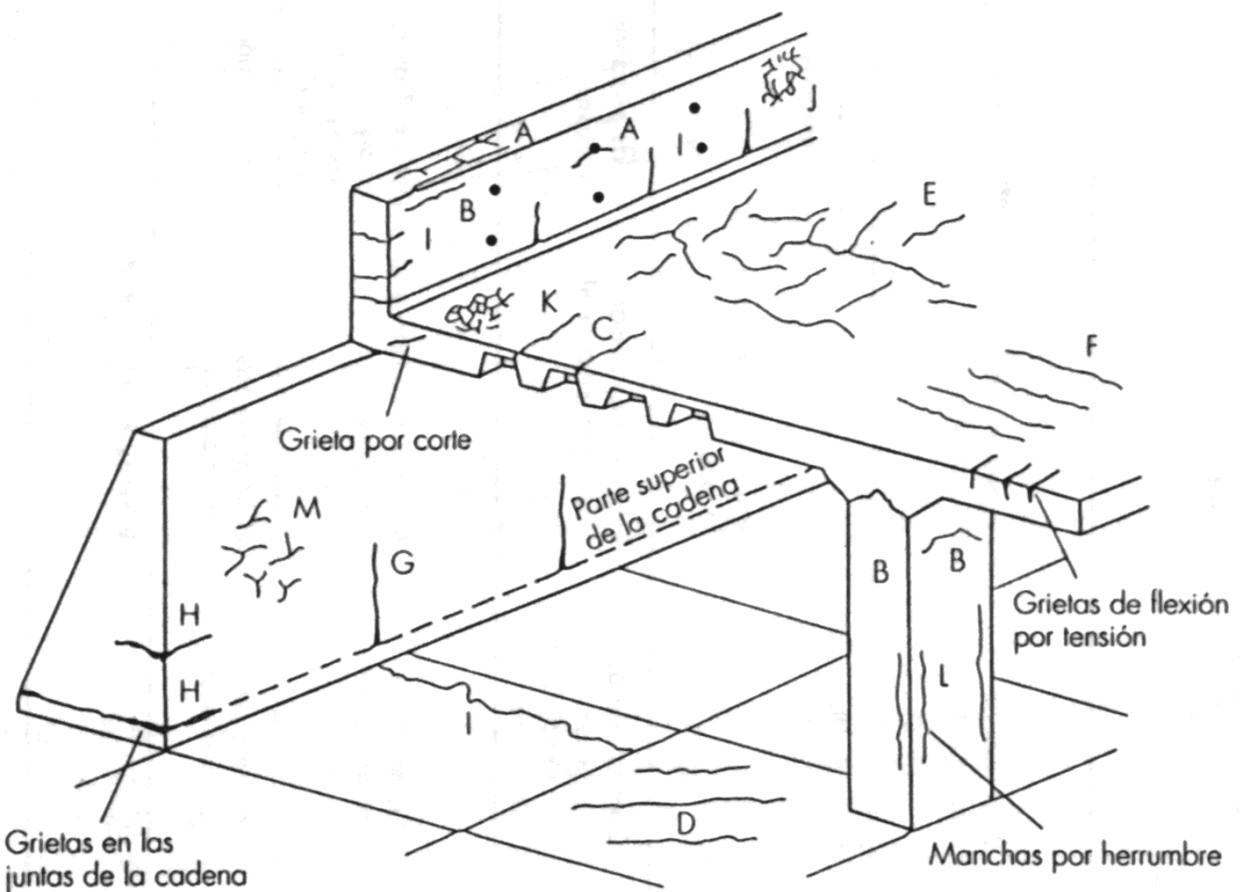




• DURABILIDAD DEL HORMIGÓN



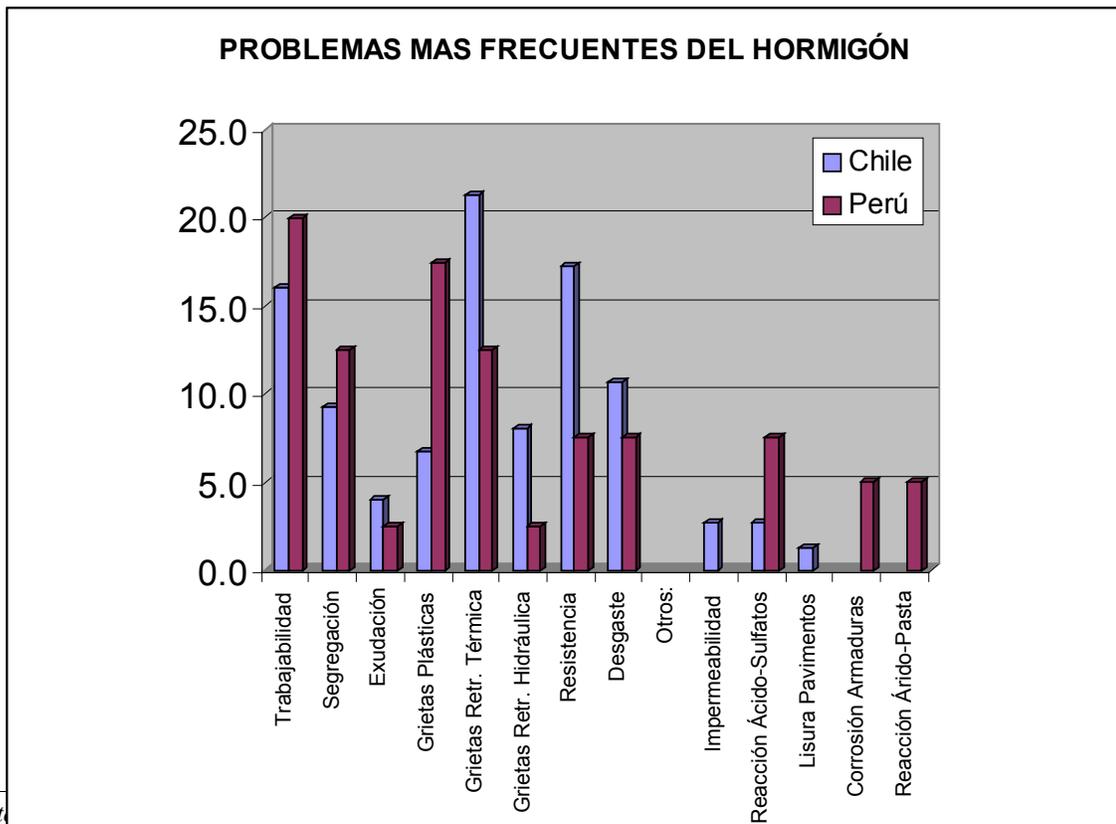
➤ Agrietamiento del Hormigón





➤ **Problemas más Frecuentes del Hormigón**

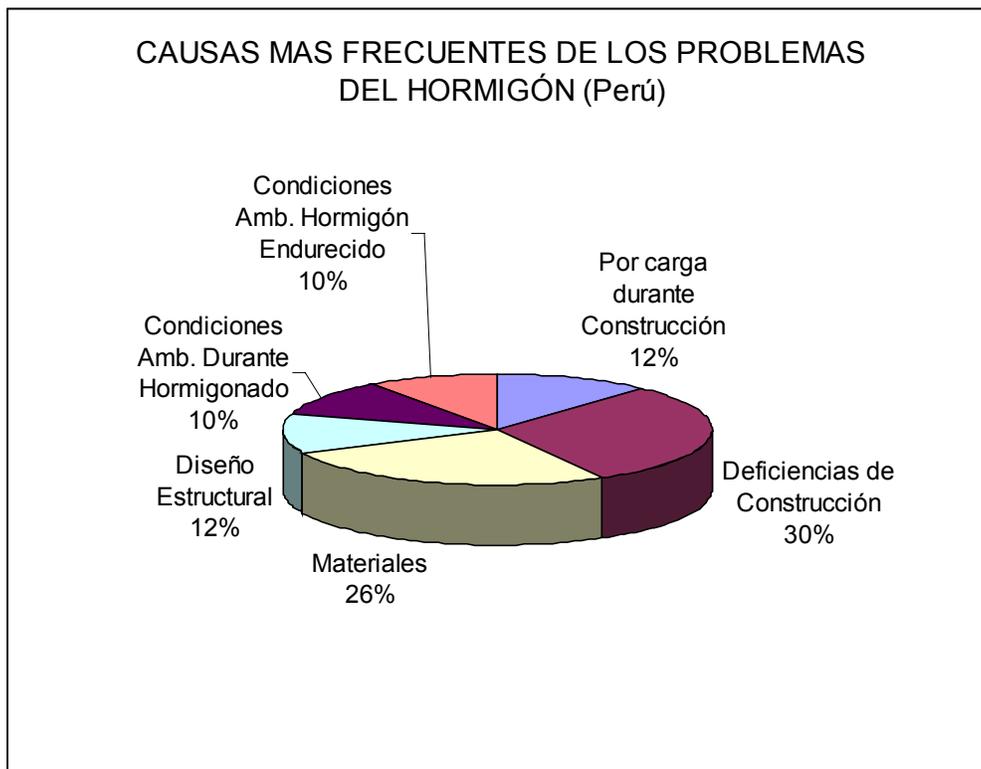
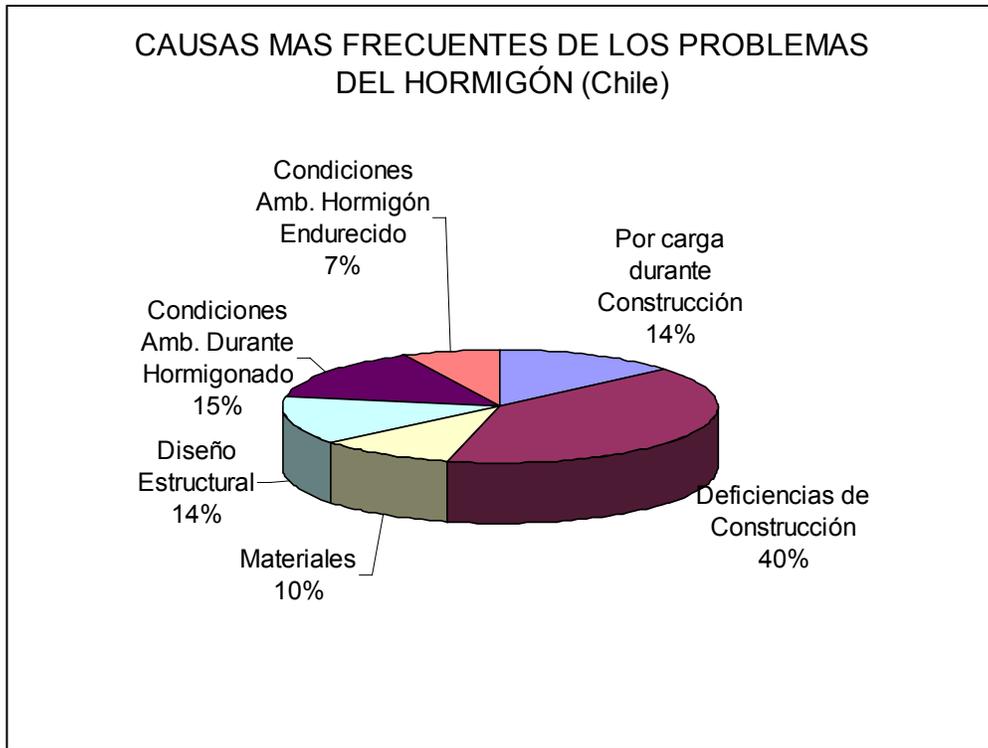
PROBLEMAS DEL HORMIGÓN	ESTADO HORMIGÓN	Chile			Perú
		Constructor	Diseñador	TOTAL	TOTAL
Trabajabilidad	Hormigón Fresco	18.8	14.0	16.0	20.0
Segregación		9.4	9.3	9.3	12.5
Exudación		3.1	4.7	4.0	2.5
Grietas Plásticas (0-48 horas)		6.3	7.0	6.7	17.5
Grietas Retracción Térmica (2-30 días)	Hormigón Endurecido	25.0	18.6	21.3	12.5
Grietas Retracción Hidráulica (> 30 días)		9.4	7.0	8.0	2.5
Resistencia		12.5	20.9	17.3	7.5
Desgaste		9.4	11.6	10.7	7.5
Otros:	Otros				
Impermeabilidad			4.7	2.7	
Destrucción por Acido-Sulfatos		3.1	2.3	2.7	7.5
Lisura Pavimentos		3.1		1.3	
Corrosión Armaduras					5.0
Reacción Árido-Pasta					5.0
TOTAL		100.0	100.0	100.0	100.0





➤ Causas más Frecuentes de los Problemas del Hormigón

Causas	Chile			Perú
	Constructor	Diseñador	Total	Total
Por carga durante Construcción				
Desmoldes prematuros	1.9	4.1	3.2	5.8
Deformación moldaje o alzaprima	9.6	5.4	7.1	2.9
Carga prematura (trabajos de construcción)	5.8	1.4	3.2	1.4
Asentamientos diferenciales				1.4
Subtotal	17.3	10.8	13.5	11.6
Deficiencias de Construcción				
Transporte inadecuado al interior obra		2.7	1.6	
Técnicas de colocación inadecuados	3.8	6.8	5.6	2.9
Vibrado inadecuado	11.5	2.7	6.3	2.9
Curado inadecuado	5.8	8.1	7.1	10.1
Alta temperatura materiales constituyentes y hormigón		1.4	0.8	1.4
Secuencia de hormigonado	7.7	2.7	4.8	5.8
Mal tratamiento de juntas de construcción	7.7	10.8	9.5	4.3
Tipo de moldajes	3.8	5.4	4.8	2.9
Subtotal	40.4	40.5	40.5	30.4
Materiales				
Variabilidad calidad materiales constituyentes		5.4	3.2	8.7
Aridos	5.8	4.1	4.8	10.1
Cemento	1.9		0.8	1.4
Agua	1.9	1.4	1.6	2.9
Exceso de aditivos				2.9
Subtotal	9.6	10.8	10.3	26.1
Diseño Estructural				
Armadura insuficiente				
Alta densidad de enfierradura	77.0	4.1	5.6	2.9
Cambio brusco de sección (planta o elevación)		4.1	2.4	4.3
Juntas de dilatación (espaciamiento, corte, tiempo espera)	7.7	4.1	5.6	4.3
Subtotal	15.4	12.2	13.5	11.6
Condiciones Ambientales Durante Hormigonado				
Temperatura ambiente alta	7.7	8.1	7.9	5.8
Viento fuerte	3.8	5.4	4.8	
Humedad relativa baja	1.9	2.7	2.4	4.3
Subtotal	13.5	16.2	15.1	10.1
Condiciones Ambientales Hormigón Endurecido				
Ataque químico		5.4	3.1	1.4
Ciclo hielo/deshielo	3.8	4.1	4.0	7.2
Humedad relativa baja				1.4
Subtotal	3.8	9.5	7.1	10.1
Total	100.0	100.0	100.0	100.0

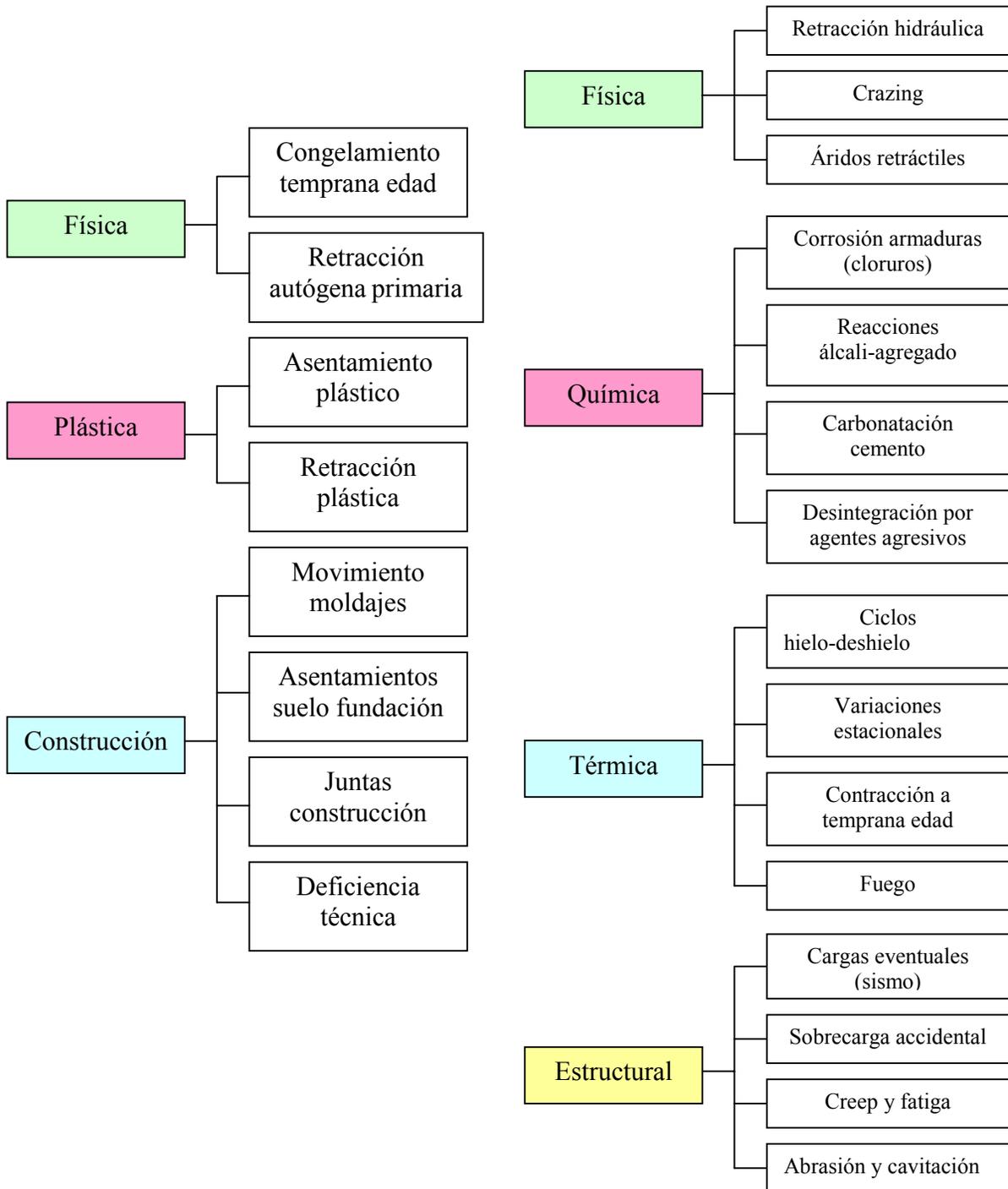




➤ **Causas de Agrietamiento**

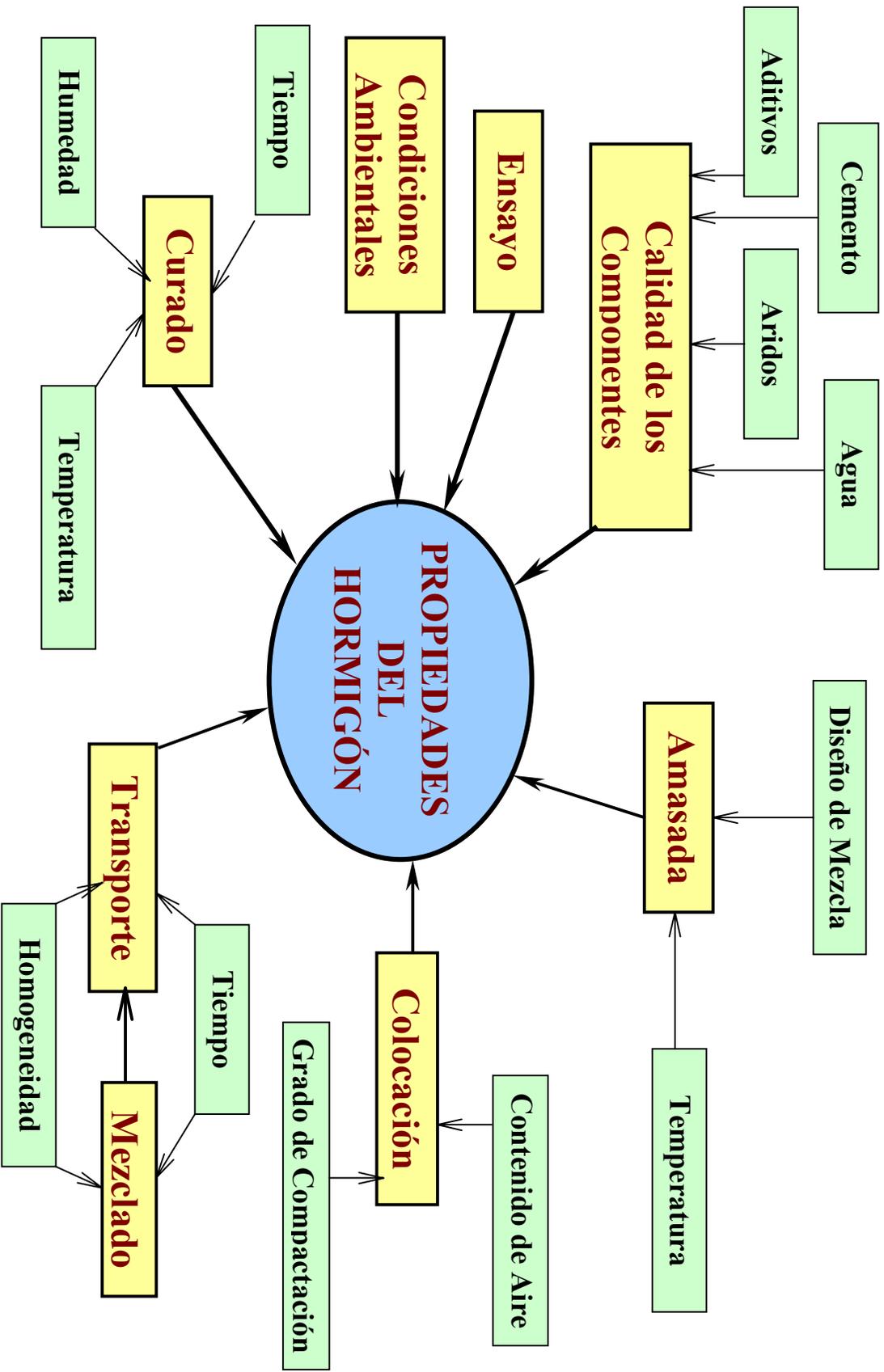
Agrietamientos

Antes del Endurecimiento Después del Endurecimiento





• FACTORES QUE AFECTAN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN





• **RESPONSABILIDAD INDIVIDUAL**

Hammurabi, un rey de Babilonia, que vivió hace cuatro mil años, tuvo las siguientes reglas de responsabilidad de los constructores:

"Si una construcción se cae causando la muerte del dueño o su hijo, cualquiera sea el caso, el constructor o su hijo deben ser muertos. Si el esclavo del dueño de la casa muere, él deberá entregarle un esclavo del mismo valor. Si otras posesiones son destruidas, estas deberán ser restituidas, y las partes dañadas de la casa deberán ser reconstruidas a costo del constructor."



Para aquellos comprometidos en la industria de la construcción con hormigón, el código de Hammurabi debe ser un recordatorio de la responsabilidad individual con la durabilidad de las estructuras.



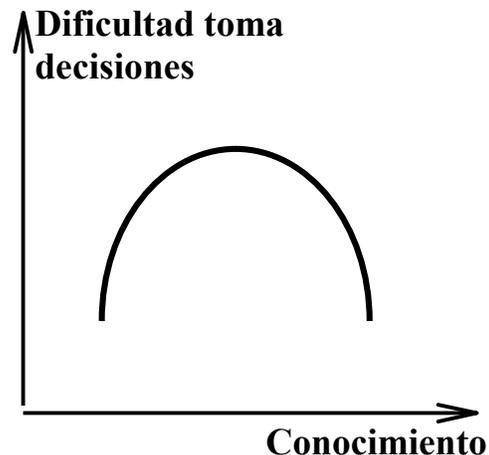
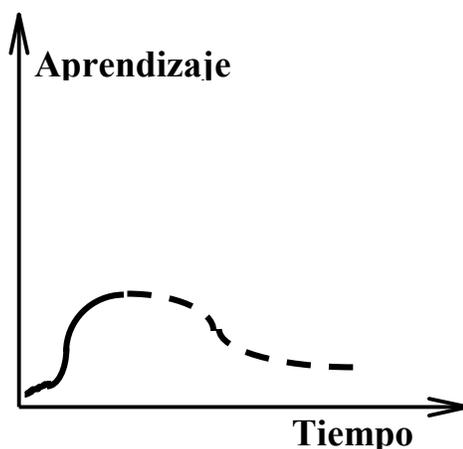
• ¿QUÉ ES UN BUEN HORMIGÓN?

DIFERENCIAS

⇒ **HORMIGÓN MALO:** Sustancia de pésima CONSISTENCIA (sopa), que endurece formando una masa llena de HUECOS, NO HOMOGÉNEA y DÉBIL, que se fabrica mezclando cemento, áridos y agua.

- ✓ DIFERENCIA RADICA SOLAMENTE EN SABER HACERLO BIEN (**KNOW - HOW**)
- ✓ GENERALMENTE SIN UN MAYOR COSTO DE **MANO DE OBRA** (RESPONSABLE DIFERENCIA)

⇒ **HORMIGÓN BUENO:** Ingredientes son los mismos





REQUISITOS GENERALES

• **EN ESTADO FRESCO: TRABAJABILIDAD**

- ✓ **FLUIDEZ:** docilidad adecuada para que pueda ser compactado con los medios disponibles en terreno
- ✓ **CONSISTENCIA:** cohesión o trabazón adecuada para ser transportado y colocado sin SEGREGACION con los medios disponibles en terreno

⇒ **UNIFORMIDAD**

• **EN ESTADO ENDURECIDO**

- ✓ **RESISTENCIA:** - resistir esfuerzos solicitantes
 - muchas propiedades deseadas están relacionadas con resistencia (excep. retracción hidráulica y a veces creep)
- ✓ **DENSIDAD:** - alta - normal - baja
 - máximo contenido de sólidos (áridos o cemento)
 - pasta cemento normalmente más débil ($\approx 28\%$ porosidad)
- ✓ **DURABILIDAD:** - resistencia a ataques físicos (ej. abrasión)
 - resistencia a ataques químicos (ej. sulfatos)
- ✓ **ESTABILIDAD VOLUMÉTRICA:** - humedad
 - temperatura
- ✓ **IMPERMEABILIDAD:** > con < W/C
 - > dosificación y compactación adecuadas
- ✓ **RESISTENCIA A LA TRACCIÓN:** 1/6 a 1/10 Resistencia a compresión
- ✓ **APARIENCIA:** - textura
 - color
- ✓ **ECONOMÍA**

LAS ESPECIFICACIONES MODERNAS ESTIPULAN LAS CONDICIONES DE PROPIEDADES PARTICULARES, EN VEZ DE ESTABLECER LA CALIDAD Y LA CANTIDAD DE LOS MATERIALES CONSTITUYENTES



CLASIFICACIONES DEL HORMIGÓN

• *SEGÚN RESISTENCIA A COMPRESIÓN*

NCh 170 Of. 52		NCh 170 cR 81	
Hormigón	R ₂₈ mínima	Hormigón	R ₂₈ característica
Clase	kgf/cm ²	Clase	kgf/cm ²
A	120	H5	50
B	160	H10	100
C	180	-	150
D	225	-	
E	> 300	H35	350

• *SEGÚN PRESENCIA ARMADURAS*

⇒ Hormigón Simple

⇒ Hormigón Pretensado

⇒ Hormigón Armado

⇒ Ferrocemento

• *SEGÚN DENSIDAD APARENTE*

Hormigón Liviano: 300 a 1.800 kg/m³

Hormigón Corriente: 2.000 a 2.800 kg/m³

Hormigón Pesado: 3.000 a 4.500 kg/m³

• *OTROS*

con fibras (metálicas o no metálicas)

con azufre

con polímeros

prepacked

expansivos

etc.



RAZÓN W/C - LEY DE ABRAMS

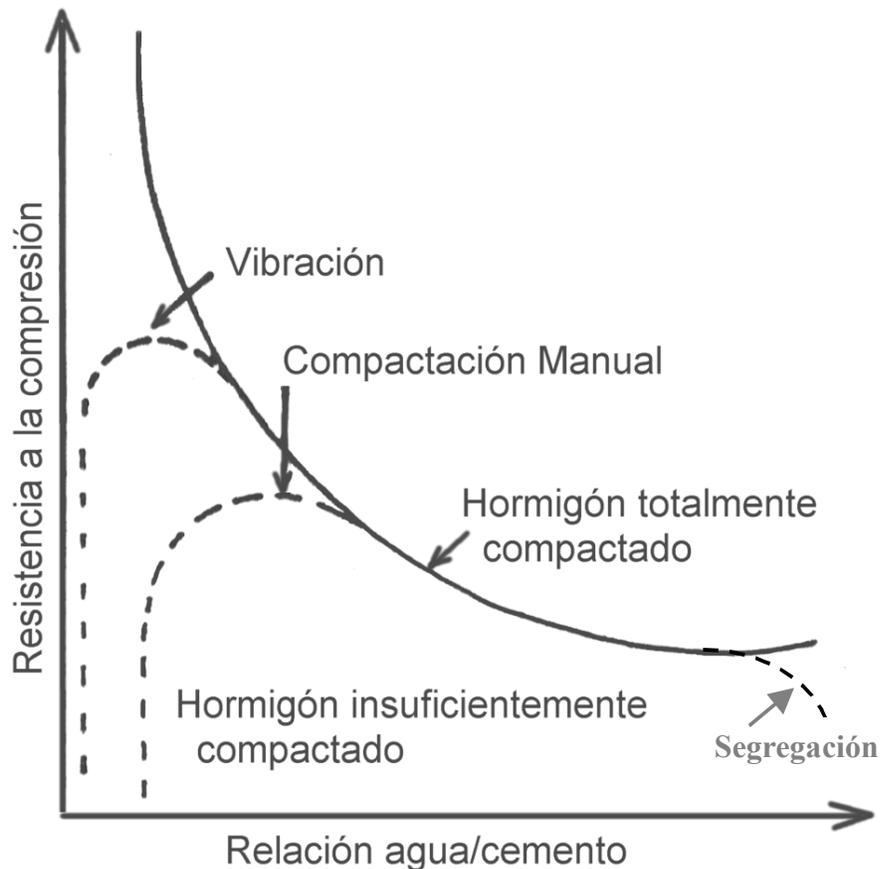
AGUA LIBRE :

Hidratación: 25 % peso cemento reacciona
Agua adicional

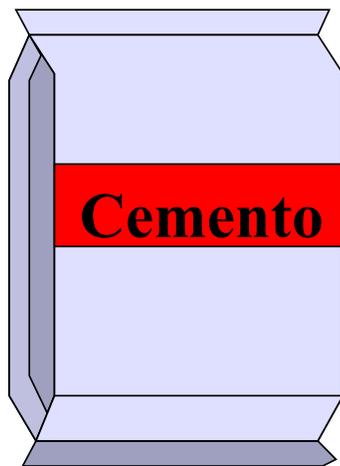
$$\text{RAZÓN W/C} = \frac{\text{peso agua libre}}{\text{peso cemento}}$$

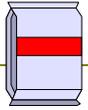
$$\text{LEY DE ABRAMS: } R = \frac{A}{B^x}$$

con: $x =$ razón W/C
 $A, B =$ constantes de cada cemento

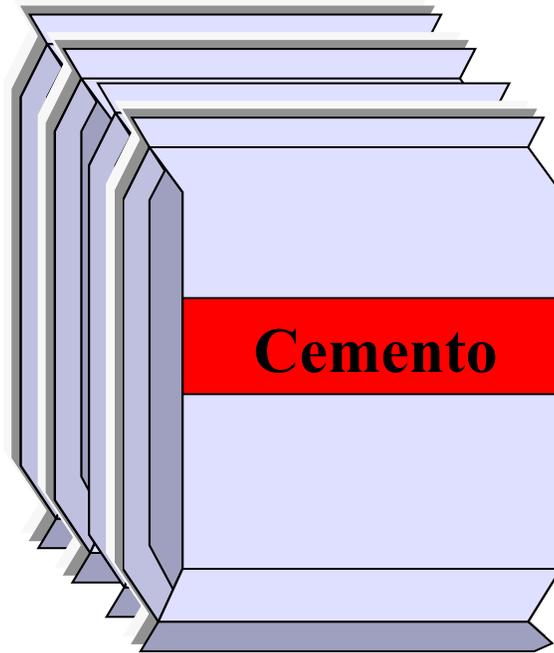


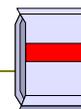
Materiales Componentes del Hormigón





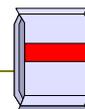
CEMENTO



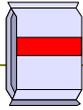


INDICE CEMENTO

ANTECEDENTES SOBRE EL CEMENTO	4
CEMENTO PORTLAND	5
• FUNCIONES	5
• TIPOS DE CEMENTO	6
• PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND	7
➤ Esquema de una planta de cemento	8
• COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND	10
➤ Determinada por Análisis Químico Analítico	10
➤ Principales Compuestos del Cemento	11
➤ Cálculo Composición Potencial Cemento	11
• CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES HIDRÁULICOS DEL CEMENTO	12
HIDRATACIÓN DEL CEMENTO	14
FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO DE LA PASTA DE CEMENTO	14
Representación Esquemática de la Formación e Hidratación del Cemento Portland	14
• PROCESOS QUÍMICOS DEL CEMENTO	15
• CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENDURECIMIENTO	16
• TEORÍAS DEL PROCESO FÍSICO – QUÍMICO	17
• REACCIONES QUÍMICAS DE LA HIDRATACIÓN	18
• DESARROLLO DE LA HIDRATACIÓN	19
ESTRUCTURA DE LA PASTA DE CEMENTO HIDRATADA	20
• FASES SÓLIDAS EN PASTA DE CEMENTO HIDRATADA	22
• VACÍOS EN LA PASTA DE CEMENTO	23
• AGUA EN LA PASTA DE CEMENTO HIDRATADA	24
• VOLUMEN DE PRODUCTOS DE LA HIDRATACIÓN	25
➤ Proporciones Volumétricas Durante la Hidratación	26
➤ Porosidad de la Pasta de Cemento Hidratada	30
PROPIEDADES DEL CEMENTO	31
• FRAGUADO DEL CEMENTO	31
➤ Rigidización de la Pasta de Cemento	31
• COMPONENTES DEL CEMENTO	33



➤ Superficie Específica de las Partículas de Cemento	33
• DESARROLLO DE CALOR DE LOS COMPONENTES DEL CEMENTO	35
• DESARROLLO DE RESISTENCIA	39
• ESTABILIDAD DE VOLUMEN	42
ENSAYOS DEL CEMENTO	43
CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS PORTLAND	45
• SEGÚN SU COMPOSICIÓN QUÍMICA (ASTM)	45
➤ Calor de Hidratación de los Componentes del Cemento	45
• REQUISITOS QUÍMICOS PARA CEMENTOS	47
• TIPOS DE CEMENTOS NORMALIZADOS POR LAS NORMAS CHILENAS	47
• CARACTERÍSTICAS DE LOS CEMENTOS Y ENSAYOS NORMALIZADOS	48
CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO	51
• ENSAYOS DE APTITUD	51
• ENSAYOS DE HOMOGENEIDAD	51
➤ Variaciones de R ₂₈ del Cemento Especial	52
RESUMEN CEMENTOS	55



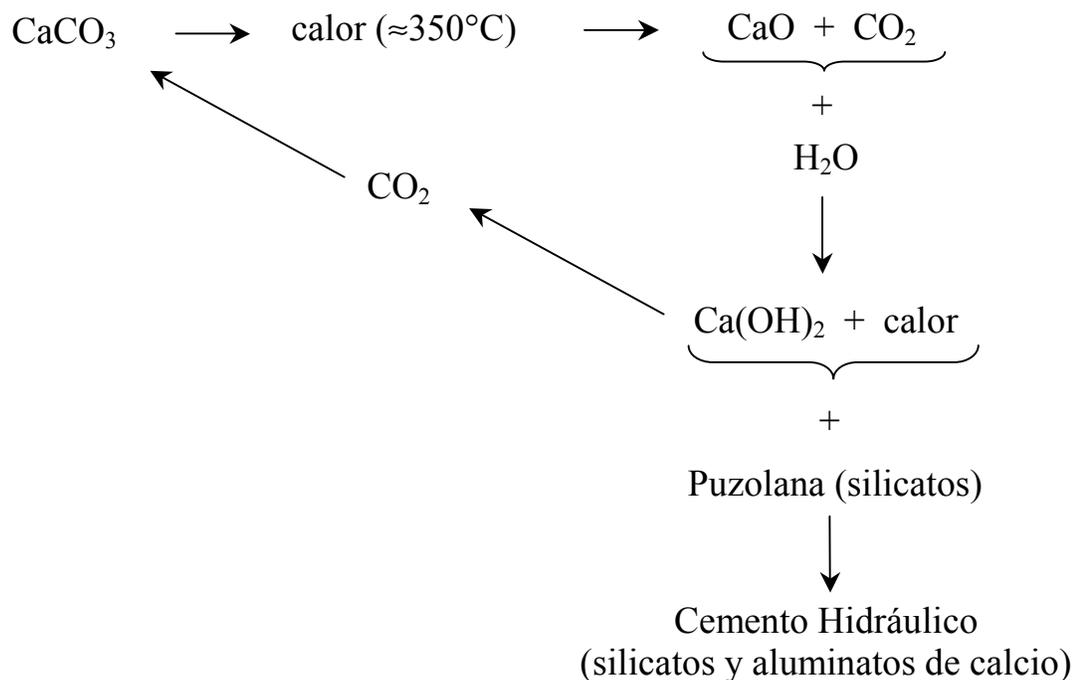
ANTECEDENTES SOBRE EL CEMENTO

DEFINICIÓN

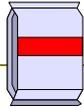
Material pulverizado (polvo muy fino, partículas angulares rango de tamaño de 1-50 μm , de color gris; óxidos de fierro) de naturaleza inorgánica, el que mezclado con agua endurece tanto al aire como bajo agua. Da altas resistencias mecánicas y productos, en su mayor parte, insolubles en agua.

HISTORIA

4000 AC. Yeso impuro calcinado (sulfato de calcio $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$)
Romanos y Griegos usan caliza calcinada (carbonato de calcio CaCO_3)



En UK y USA producen cemento Portland (1800)
Cementos especiales: siderúrgicos, expansivos, etc.



CEMENTO PORTLAND

DEFINICION

Producto obtenido por pulverización de :

CLINKER, producido por calcinación de **Calizas** (carbonato de calcio CaCO_3) y **Arcillas** (sílice), que genera los **Silicatos Hidráulicos de Calcio**

+

YESO (sulfato de calcio CaSO_4) que actúa como retardador de fraguado.

• FUNCIONES

Llenar huecos entre partículas del árido, aglomerándolas. Lubrica y da cohesión al hormigón en estado fresco.

Proporciona resistencia al hormigón endurecido, dependiendo de:

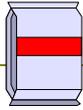
razón agua/cemento

tipo de cemento

condiciones de curado

en **estado endurecido**

Da impermeabilidad al hormigón endurecido, al taponar huecos entre los granos de árido en condiciones de servicio.



- **TIPOS DE CEMENTO**

PORTLAND

CLÍNKER + 3 a 5% MINERAL DE YESO (bajo malla 80 μm)

PORTLAND CON AGREGADOS

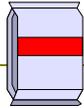
CLÍNKER + 3 a 5% MINERAL DE YESO (bajo malla 80 μm)

+ $\leq 30\%$ AGREGADOS { MAT. NATURALES
(puzolanas)
RESIDUOS INDUSTRIALES
(escoria alto horno)

CON AGREGADOS

CLÍNKER + 3 a 5% MINERAL DE YESO (bajo malla 80 μm)

+ $\geq 30\%$ AGREGADOS



• PROCEDIMIENTO DE FABRICACIÓN DEL CEMENTO PORTLAND

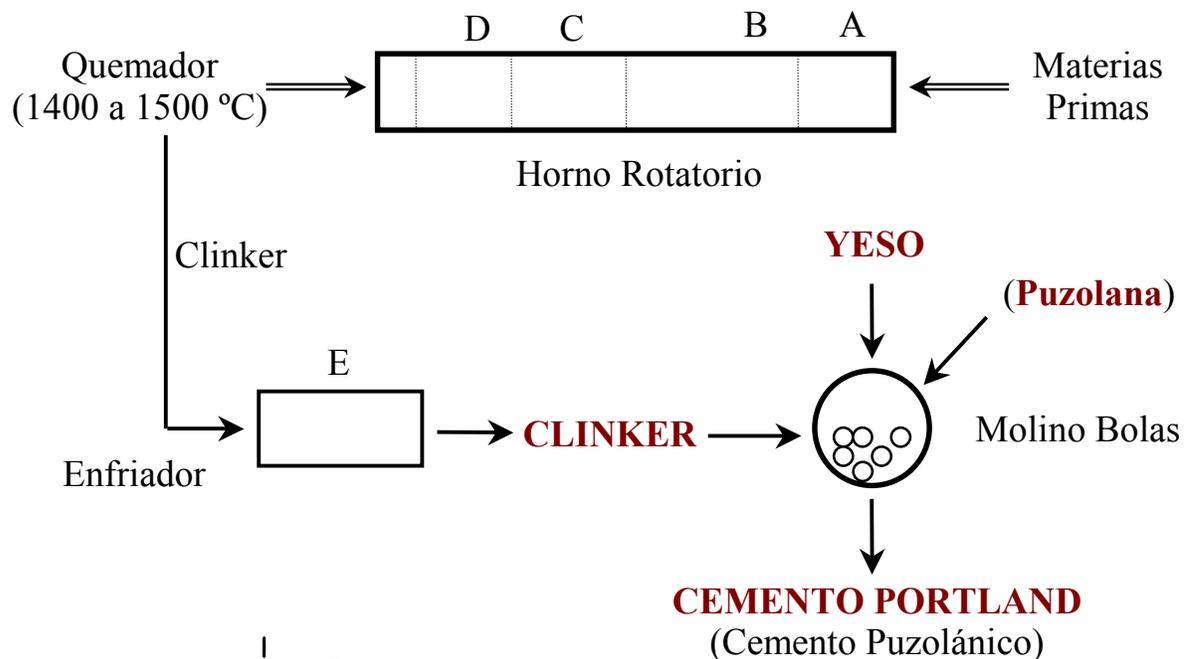
Materias primas :

caliza (CaCO_3)
 arcilla (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3)
 escoria (%)

Molienda materias primas - (Preparación pasta)

Calcinación Horno Rotativo → Clínter

Longitud : 100 - 200 m. - Diámetro : 10 - 20 m.
 Veloc. rotación : 40 seg/rev. - Temperatura máx. : 1500°C

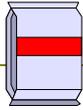


ZONAS DEL HORNO

- A Secado, se elimina agua
 B Descarbonatación, se libera CO_2 : $\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$
 C Se forma C_2S , C_3A , C_4AF
 D Clinkerización o fusión parcial, se forma C_3S : $\text{C}_2\text{S} + \text{C} \rightarrow \text{C}_3\text{S}$
 E Si enfriamiento es lento, se revierte formación de C_3S y se forma cal libre.

Molienda del Clínter

- Adición de yeso
- Adición de agregados (puzolana, escoria)



➤ *Esquema de una planta de cemento*

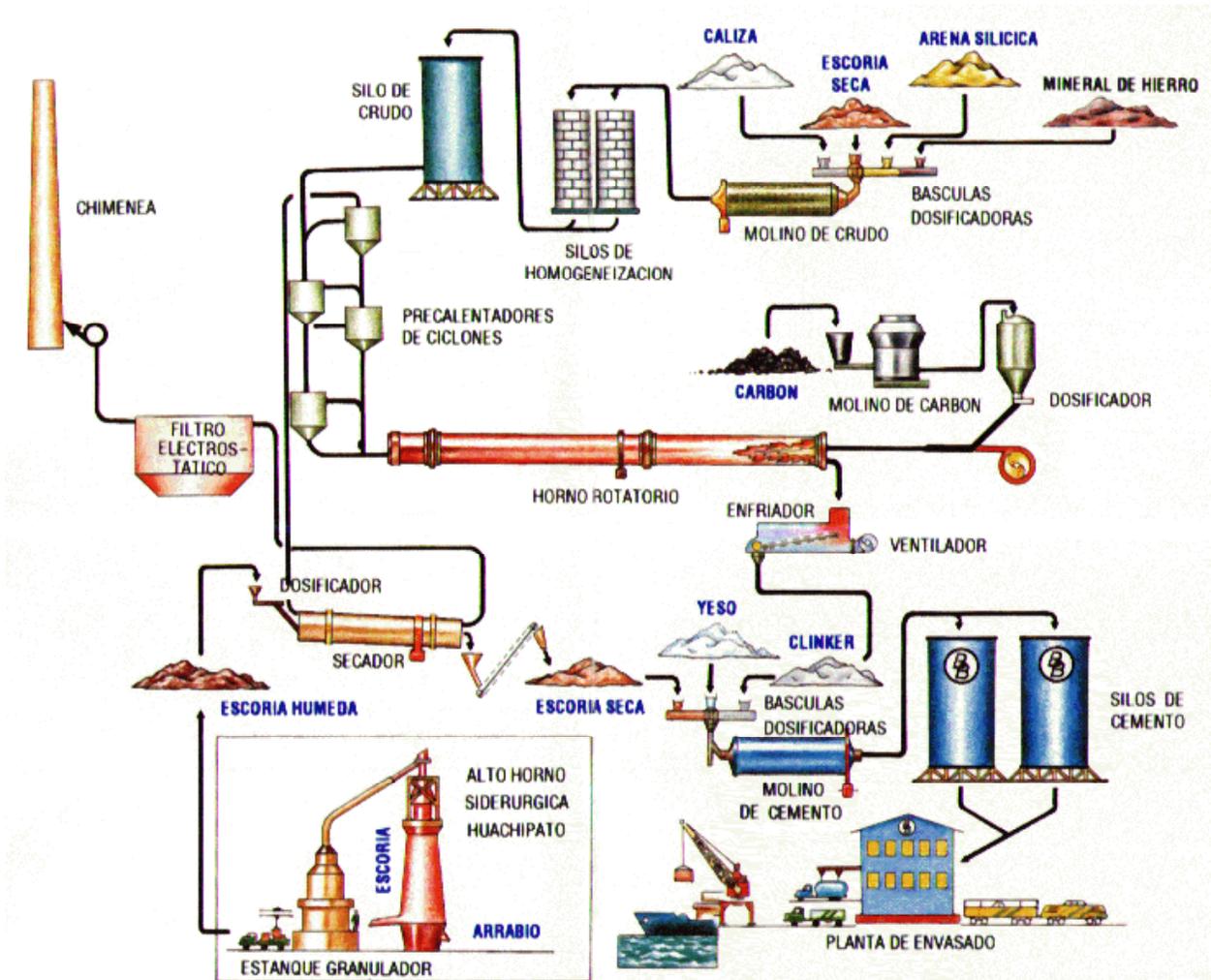
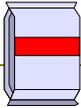
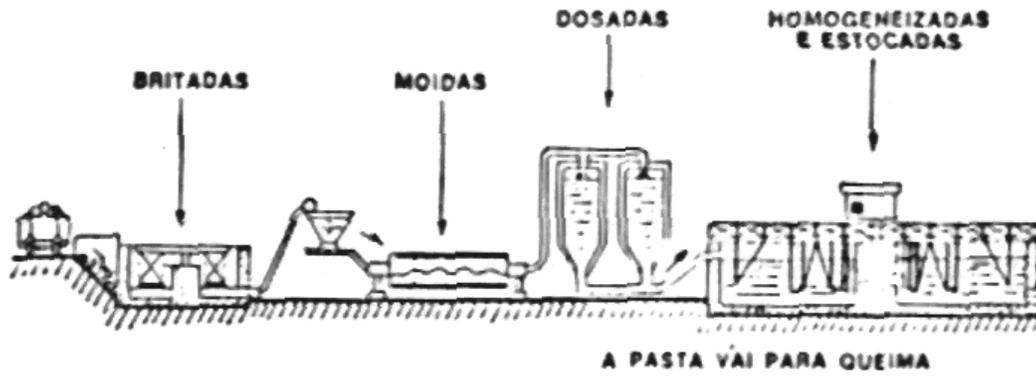


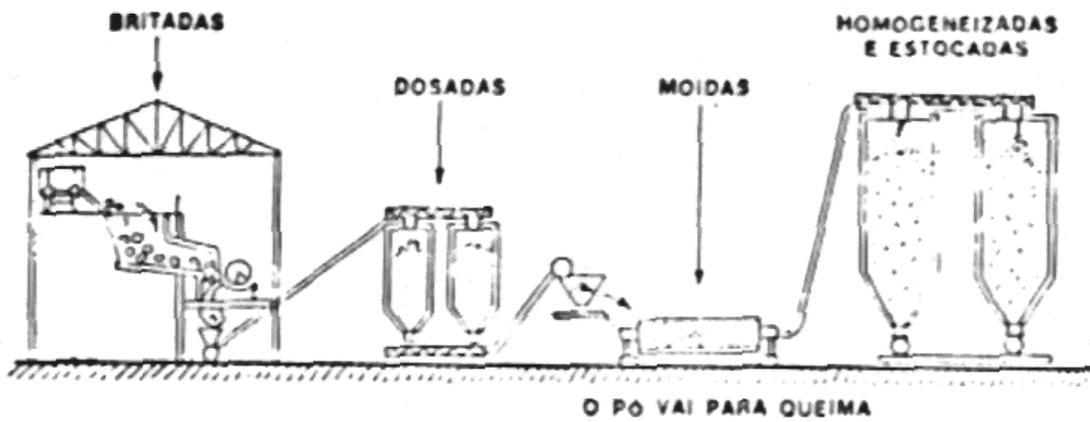
Figura 1. Proceso de fabricación de los cementos BIO-BIO S.A.C.I

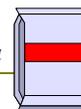


Vía Húmeda



Vía Seca

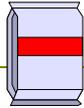




• COMPOSICIÓN QUÍMICA DEL CEMENTO PORTLAND

➤ *Determinada por Análisis Químico Analítico*

Componentes Principales	Notación Química	Origen	Proporción (%)	Características
CaO (cal)	C	Carbonato de calcio (caliza)	60 - 67	- Componente principal - Prop. mecánicas aumentan con cantidad de cal - Cal libre, encima de ciertos límites, perjudica estabilidad de volumen
SiO ₂ (sílice)	S	Arcillas	17 - 25	- Por combinación con la cal resultan los compuestos más importantes del cemento
Al ₂ O ₃ (alúmina)	A	Arcillas	3 - 8	- Fundente - Acelera fraguado cemento - Reduce resistencia a los sulfatos
Fe ₂ O ₃ (óxido de fierro)	F	Arcillas	0,5 - 6	- Fundente más enérgico - Junto con alúmina facilita producción comercial de cemento con alto % de cal sin tener cal libre
SO ₃ (sulfatos)	S	Sulfato de calcio (yeso)	≤ 3	- Retarda fraguado - En exceso produce sulfoaluminato que perjudica estabilidad de volumen
MgO (Magnesia)		Caliza o arcilla	0,1 - 4	- En grandes cantidades actúa como expansivo
K ₂ O y Na ₂ O (álcalis)		Caliza o arcilla	0,2 - 1,3	- Fundente - Provee alcalinidad al hormigón - Acelerador fraguado - Reacción alcali-agregado (expansión)
TiO ₂ - MnO ₃ -P ₂ O ₅				
Residuo insoluble		Impurezas yeso	≤ 0,5	- Medida adulteración cemento
Pérdidas al fuego			2	- Medida carbonatación e hidratación de cal y magnesio libre por exposición atmosférica
H ₂ O	H			



➤ Principales Compuestos del Cemento

Nombre del Compuesto	Composición Óxidos	Abreviatura	%	Evolución calor hidrat.	Resistencia y endurec.
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C₃S	42 - 60	Rápido	Mediano plazo (primeras 4 sem.)
Silicato bicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C₂S	14 - 35	Lento	Largo plazo (4 sem. →)
Aluminato tricálcico (*)	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C₃A	6 - 13	Muy rápido	Corto plazo (1-3 días)
Ferro aluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C₄AF	5 - 10	Muy lento	Largo plazo (primeros meses)

* sensible a ataques de sulfatos
+ otros como ser (MgO, CaO, Na₂O, K₂O, etc.)

➤ Cálculo Composición Potencial Cemento

A PARTIR DE ECUACIÓN DE R. H. BOGUE

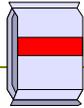
$$\mathbf{C_3S} = 4,07 (\text{CaO}) - 7,60 (\text{SiO}_2) - 6,72 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1,43 (\text{Fe}_2\text{O}_3) - 2,85 (\text{SO}_3)$$

$$\mathbf{C_2S} = 2,87 (\text{SiO}_2) - 0,754 (3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)$$

$$\mathbf{C_3A} = 2,65 (\text{Al}_2\text{O}_3) - 1,69 (\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

$$\mathbf{C_4AF} = 3,04 (\text{Fe}_2\text{O}_3)$$

NOTA : TÉRMINOS ENTRE PARÉNTESIS REPRESENTAN LOS PORCENTAJES DEL ÓXIDO DADO, EN LA MASA TOTAL DEL CEMENTO



• CARACTERÍSTICAS DE LOS COMPONENTES HIDRÁULICOS DEL CEMENTO

C_3S

Reacciona rápido con el agua, liberando calor y formando silicato de calcio hidratado (**CSH**).

Tiene gran resistencia y es el principal componente de resistencia a temprana edad.

Cementos de bajo calor de hidratación deben tener bajo contenido de este compuesto.

C_2S

Reacciona lento con el agua para formar el mismo tipo de compuestos que el C_3S (**CSH**).

Tiene gran resistencia.

Por su reacción más lenta el calor tiene tiempo para disiparse, por lo que la temperatura del hormigón es menos elevada.

Contribuye a resistencias a mayor edad.

C_3A

Por su reacción inmediata con el agua, debe ser retardado con la adición de yeso al Clínter, que forma un sulfo-aluminato.

Reacciona muy rápido y libera mucho calor al hidratarse.

Contribuye a resistencia a muy temprana edad, pero poco a la resistencia final.

Reacciona con sulfatos una vez endurecido, produciendo expansión y daño al hormigón. Los cementos resistentes a sulfatos deben limitar el contenido de este compuesto, lo que se logra añadiendo óxido férrico transformándolo en C_4AF .

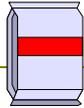
C_4AF

Reacciona rápido con el agua, pero no produce mucho calor ni resistencia.

Es de color gris oscuro, por lo que no debe existir en cemento blanco.

FINURA : La reacción del cemento con el agua se acelera al aumentar la finura del cemento. Esto se debe a que existe mayor superficie de contacto. Esta mayor finura acelera la resistencia y aumenta la temperatura del hormigón, al generarse el calor más rápido.

TEMPERATURA : Una temperatura más alta acelera la reacción química.


Tabla 1. Óxidos y Compuestos que forman parte del Cemento Portland

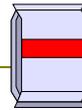
Óxidos típicos	[%]	Compuestos calculados con la ecuación de R:H:Bogue	[%]
CaO	63	C ₃ A	10,8
SiO ₂	20	C ₃ S	54,1
Al ₂ O ₃	6	C ₂ S	16,6
Fe ₂ O ₃	3	C ₄ AF	9,1
MgO	1½	Compuestos menores	-----
SO ₃	2		
K ₂ O	1		
Na ₂ O			
Otros	1		
Pérdida en el quemador	2		
Residuos insolubles	1		

Tabla 2. Influencia de cambios en la proporción de los óxidos en la proporción de los compuesto hidráulicos del cemento.

Óxidos	Porcentaje		
	(1)	(2)	(3)
CaO	66,0	63,0	66,0
SiO ₂	20,0	22,0	20,0
Al ₂ O ₃	7,0	7,7	5,5
Fe ₂ O ₃	3,0	3,3	4,5
Otros	4,0	4,0	4,0
Compuestos Hidráulicos			
C ₃ S	65	33	73
C ₂ S	8	38	2
C ₃ A	14	15	7
C ₄ AF	9	10	14

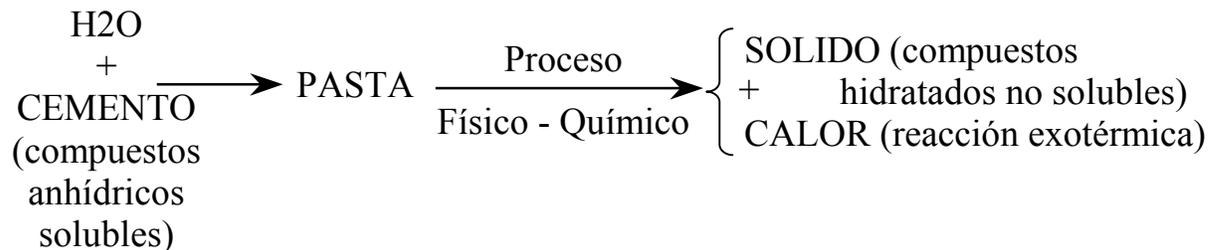
En la muestra 2 se hicieron pequeñas variaciones en los porcentajes de CaO, Al₂O₃ y Fe₂O₃ y se obtuvo una gran variación en los porcentajes de C₂S y C₃S.

En la muestra 3, en cambio, se realizaron pequeñas variaciones en los porcentajes de Al₂O₃ y Fe₂O₃ y se obtuvo una gran disminución del porcentaje de C₃A.

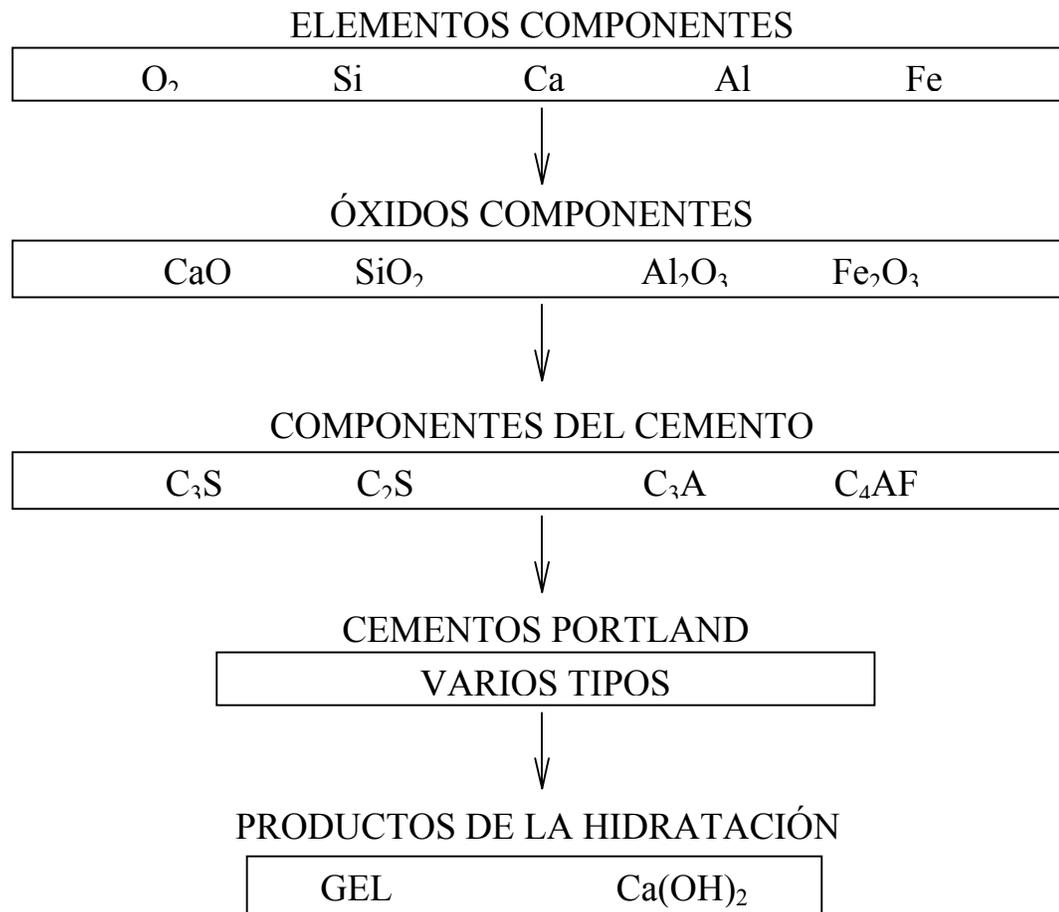


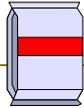
HIDRATACIÓN DEL CEMENTO

• FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO DE LA PASTA DE CEMENTO

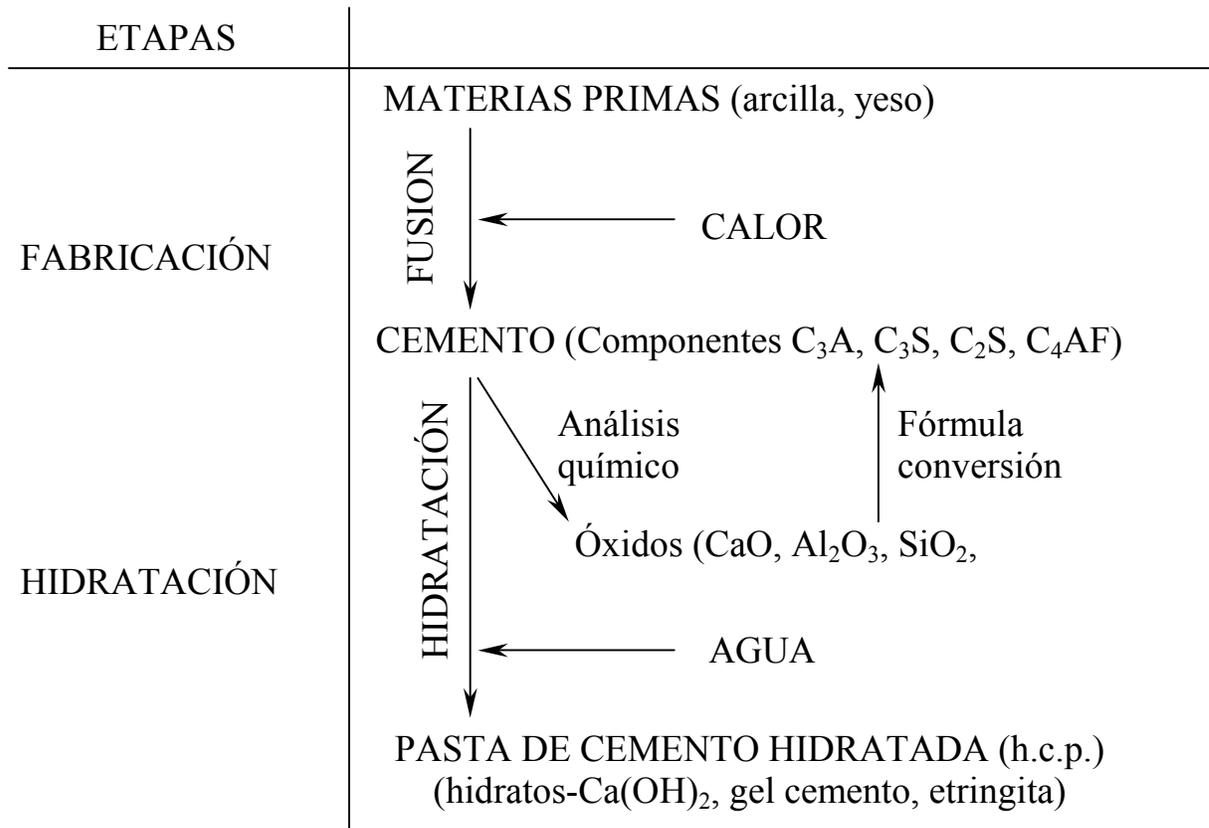


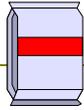
➤ Representación Esquemática de la Formación e Hidratación del Cemento Portland





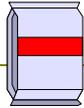
• PROCESOS QUÍMICOS DEL CEMENTO





• CARACTERÍSTICAS GENERALES DEL ENDURECIMIENTO

- ✓ **Producción de reacciones exotérmicas**
- ✓ **Producción de variaciones de volumen:**
 - Dilatación o contracción según humedad.
- ✓ **Dependen del tipo de cemento:**
 - Composición
 - Finura
- ✓ **Dependen de la temperatura**



• TEORÍAS DEL PROCESO FÍSICO – QUÍMICO

FRAGUADO Y ENDURECIMIENTO

TEORÍA CRISTALOIDAL (Le Chatelier)

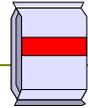
Solución en agua de los compuestos anhidros
 Formación compuestos hidratados
 Precipitación compuestos hidratados
 Formación cristales pequeños alargados y
 entrecruzados entre sí
 Desarrollo fuerzas adherencia entre cristales



TEORÍA COLOIDAL (Michaelis)

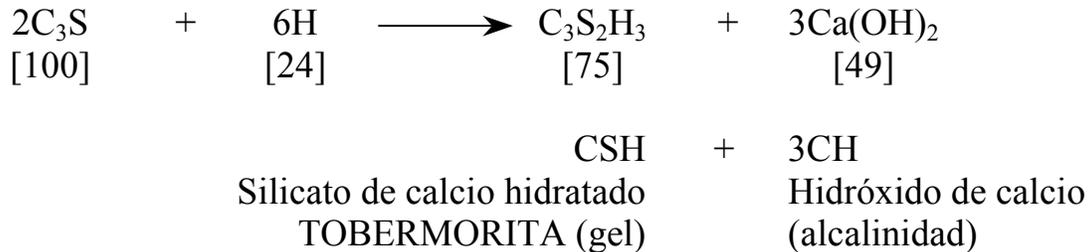
Solución en agua de compuestos anhidros
 Formación compuestos hidratados y
 precipitación de algunos en forma cristalina
 Generación solución sobresaturada en cal
 Solución actúa sobre los silicatos y por
 proceso electroquímico produce un silicato
 monocálcico hidratado poco soluble (CSH -
 Tobermorita) o geles coloidales blandos
 impermeables superficialmente.
 Granos de cemento no hidratados siguen
 absorbiendo agua del gel y provocan su
 endurecimiento superficial



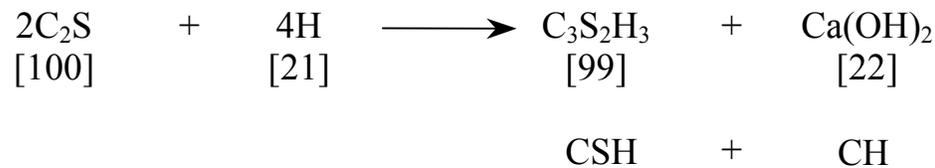


• REACCIONES QUÍMICAS DE LA HIDRATACIÓN

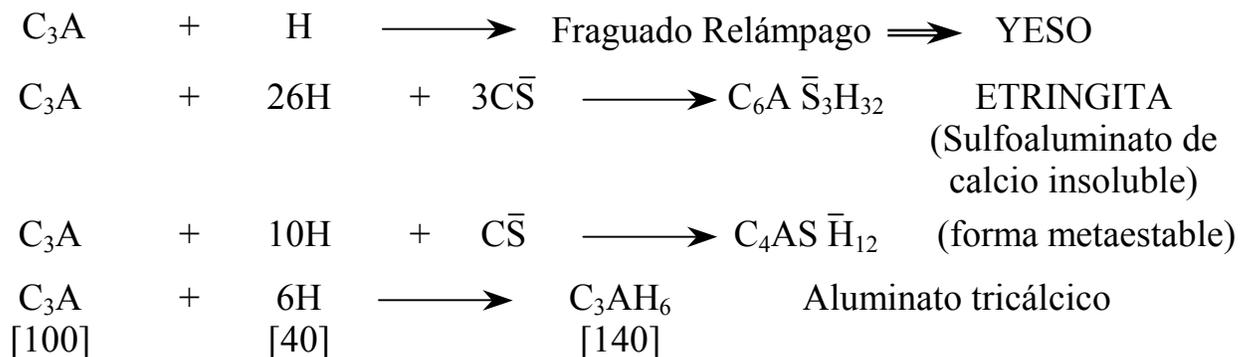
Para C₃S



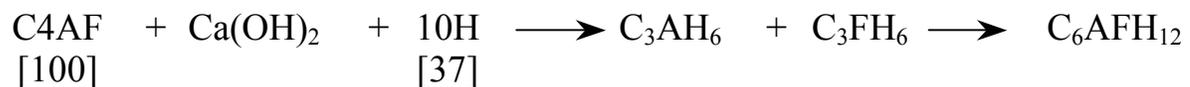
Para C₂S



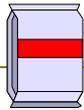
Para C₃A



Para C₄AF

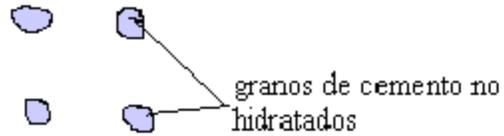


$$\text{ALCALINIDAD DEL HORMIGON} = \text{ALCALINIDAD DEL CEMENTO (K}_2\text{O + Na}_2\text{O)} + \text{CA(OH) (CH)}$$

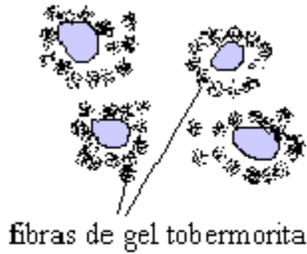


• DESARROLLO DE LA HIDRATACIÓN

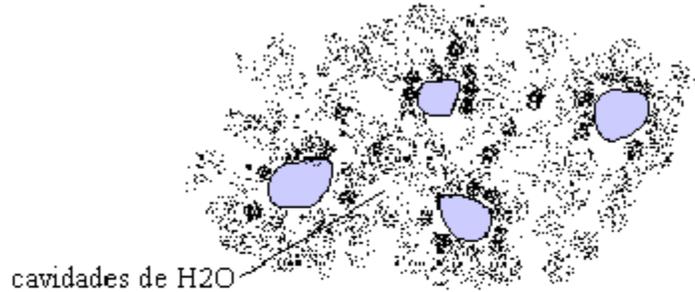
Recién mezclado



Después de 2 horas



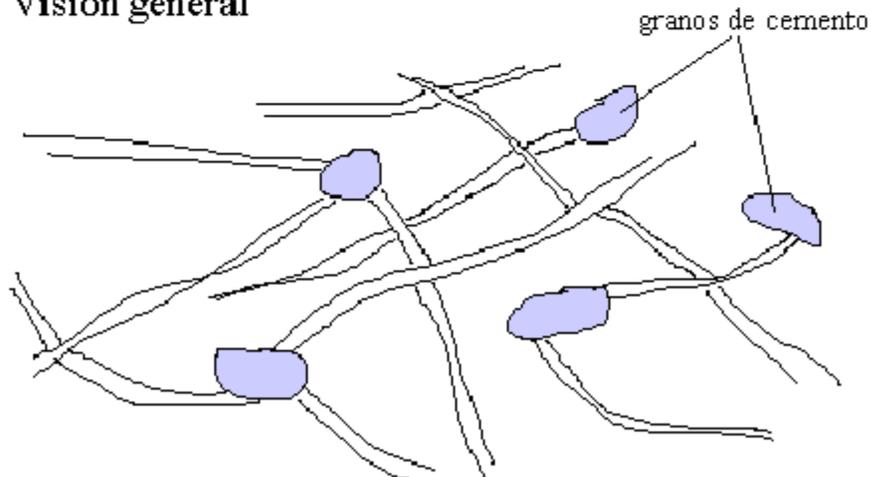
Después de 1 día

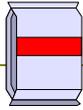


Después de 7 días



Visión general





ESTRUCTURA DE LA PASTA DE CEMENTO HIDRATADA

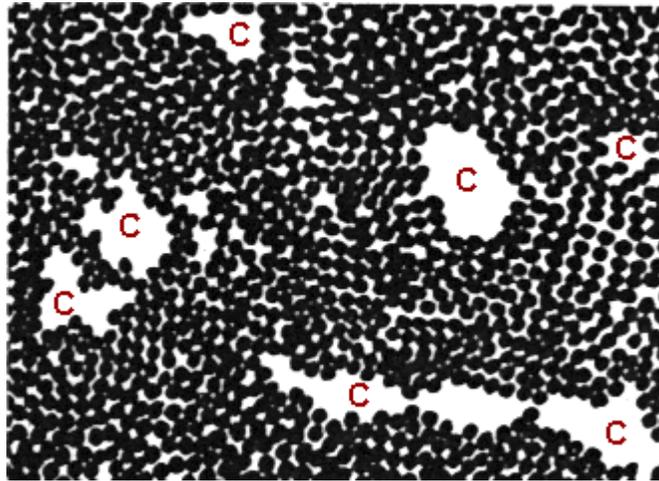


Figura 2. Modelo simplificado de la estructura de la pasta.

Puntos sólidos representan las partículas del gel; espacios intersticiales son poros del gel ; espacios tales como los marcados con C son cavidades capilares. El tamaño de los poros del gel se muestra exagerado.

FASES SÓLIDAS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ PARTÍCULAS DE GEL ▪ GRANOS DE CEMENTO NO HIDRATADOS 	<ul style="list-style-type: none"> • MICROCRISTALINOS (GEL) • CRISTALINOS
VACÍOS	<ul style="list-style-type: none"> ▪ POROS ▪ BURBUJAS DE AIRE 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ DEL GEL ▪ CAPILARES
AGUA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ QUÍMICA ▪ ENTRE CAPAS (ZEOLÍTICA - <u>ABSORCIÓN</u>) ▪ <u>ADSORBIDA</u> ▪ CAPILAR ▪ <u>ABSORCIÓN</u> ARIDOS 	

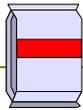
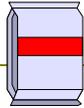


Figura 3. Cristales de Cemento Portland Hidratado



• FASES SÓLIDAS EN PASTA DE CEMENTO HIDRATADA

1. PARTÍCULAS DE GEL

MICROCRISTALINAS (gel)

C-S-H : TOBERMORITA ($C_3S_2H_3$) Silicatos de calcio hidratados (hidratos de silicato bicálcico y tricálcico).
50-60% del volumen de sólidos.
Mayor fuente de resistencia
Estructura amorfa

CRISTALINAS

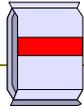
Ca(OH)₂ : Hidróxido de calcio.
20-25% del volumen de sólidos.
Forma grandes cristales hexagonales.
Influencia en la resistencia es limitada.
Mayor solubilidad que CSH, desmejora la durabilidad.

C₆A S₃H₃₂ : ETRINGITA -Sulfoaluminatos de calcio.
15-20% del volumen de sólidos.
Tienen forma de agujas hexagonales.
Contribuye a la resistencia inicial, primeras horas.
Vulnerable a los ataques químicos.

C₃AH₆ : Hidrato de aluminato tricálcico.

C₆AFH₁₂ : Hidrato de ferro-aluminato tetracálcico

2. GRANOS DE CEMENTO NO HIDRATADOS



• VACÍOS EN LA PASTA DE CEMENTO

Vacíos entre la capas de C-S-H:

Varían de 5 a 25 Å

28% de la porosidad del sólido.

No afectan resistencia ni permeabilidad.

Vacíos capilares:

Dado por la distancia entre la partículas de cemento (relación agua/cemento), y grado de hidratación.

10 a 50 nm

Vacíos más grandes de 50 nm reducen resistencia e impermeabilidad.

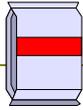
Vacíos más pequeños afectan estabilidad volumétrica.

Burbujas de aire:

Afectan resistencia y permeabilidad.

Entidad	Tamaño (Å)
Molécula de agua adsorbida	2,6
c-espacio para hidratos de CS	9-14
Espesor del poro de gel	15
Espesor del sólido de gel	30
Diámetro del poro capilar	500
Diámetro del cuerpo de gel	5.000
Diámetro del grano de cemento	300.000 (= 30 μ m)
Poros de aire	500.000 (= 50 μ m)

Tabla 3. Dimensiones típicas de la fisonomía de la pasta de cemento endurecida



• AGUA EN LA PASTA DE CEMENTO HIDRATADA

Agua química:

Agua que es parte integral de los productos hidratados del cemento.
No se pierde al secarse el cemento.

Agua de entre capas (zeolítica - absorción):

Agua asociada con la estructura laminar de C-S-H
Retenida por fuerzas de Van der Waals.
Se pierde bajo condiciones extremas de secado, (HR < 11%)
Pasta de cemento reduce su volumen al perder esta agua.

Agua adsorbida:

Agua adsorbida a la superficie de los sólidos por fuerzas físicas.
Se pierde cuando HR < 30%
Su pérdida genera importantes cambios de volumen.

Agua capilar:

Agua presente en vacíos más grandes de 50 Å.

Agua de absorción:

Rellena las porosidades del árido

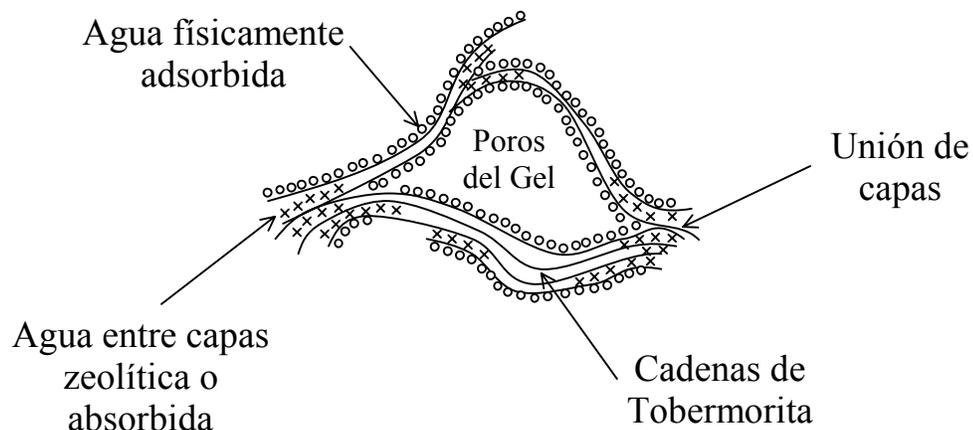
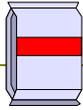


Figura 4. Estructura probable del silicato hidratado.

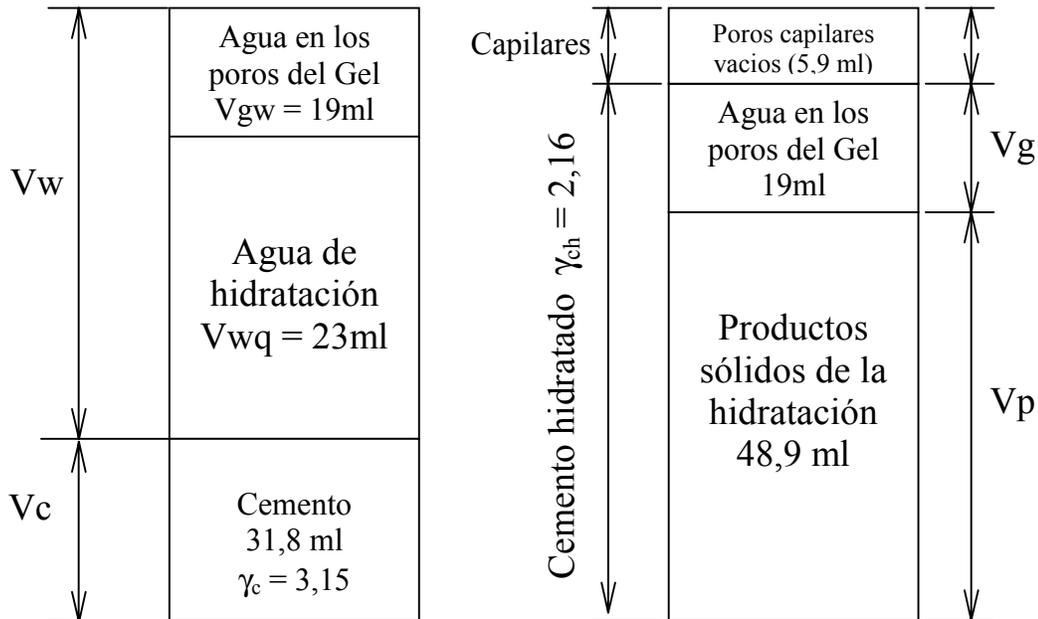


• VOLUMEN DE PRODUCTOS DE LA HIDRATACIÓN

Hidratación de la probeta sellada (despreciando exudación y contracción de la pasta)

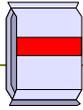
Suposiciones:

- 1.- Peso del agua no evaporable (química) = 23 % peso cemento anhidro
- 2.- Volumen cemento hidratado $V_p = V_c + V_{wq} - 0,254 V_{wq}$
- 3.- Porosidad cemento hidratado = $V_{gw}/(V_p + V_{gw}) = 28 \%$



Datos:

Peso cemento no hidratado	=	100 g.
Vol. absoluto cemento no hidratado	: V_c	= $100/3,15 = 31,8 \text{ ml.}$
Peso agua química (no evaporable)	=	$0,23 \cdot 100 = 23 \text{ g.}$
Vol. absoluto agua química	: V_{wq}	= 23 ml.
Vol. productos sólidos hidratación	: V_p	= $31,8 + 23 + (1 - 0,254) = 48,9 \text{ ml.}$
Volumen agua gel	: $V_{gw}/(48,9 + V_{gw})$	= 0,28 $\rightarrow V_{gw} = 19 \text{ ml.}$
Volumen total agua mezcla	: V_w	= $V_{wq} + V_{gw} = 23 + 19 = 42 \text{ ml.}$
Volumen cemento hidratado	: $V_p + V_{gw}$	= $48,9 + 19 = 67,9 \text{ ml.}$
Volumen original C + W	: $V_c + V_w$	= $31,8 + 42 = 73,8 \text{ ml.}$
Disminución volumen por hidratación	= $73,8 - 67,9$	= 5,9 ml. (Espacios capilares.)
Poros capilares	=	18,5 % (Vol. original cemento no hidratado)
Vol. producto de la hidratación por cada 1 ml de cemento no hidratado	=	2,1 ml.
Razón W/C (peso)	=	0,42



➤ **Proporciones Volumétricas Durante la Hidratación**

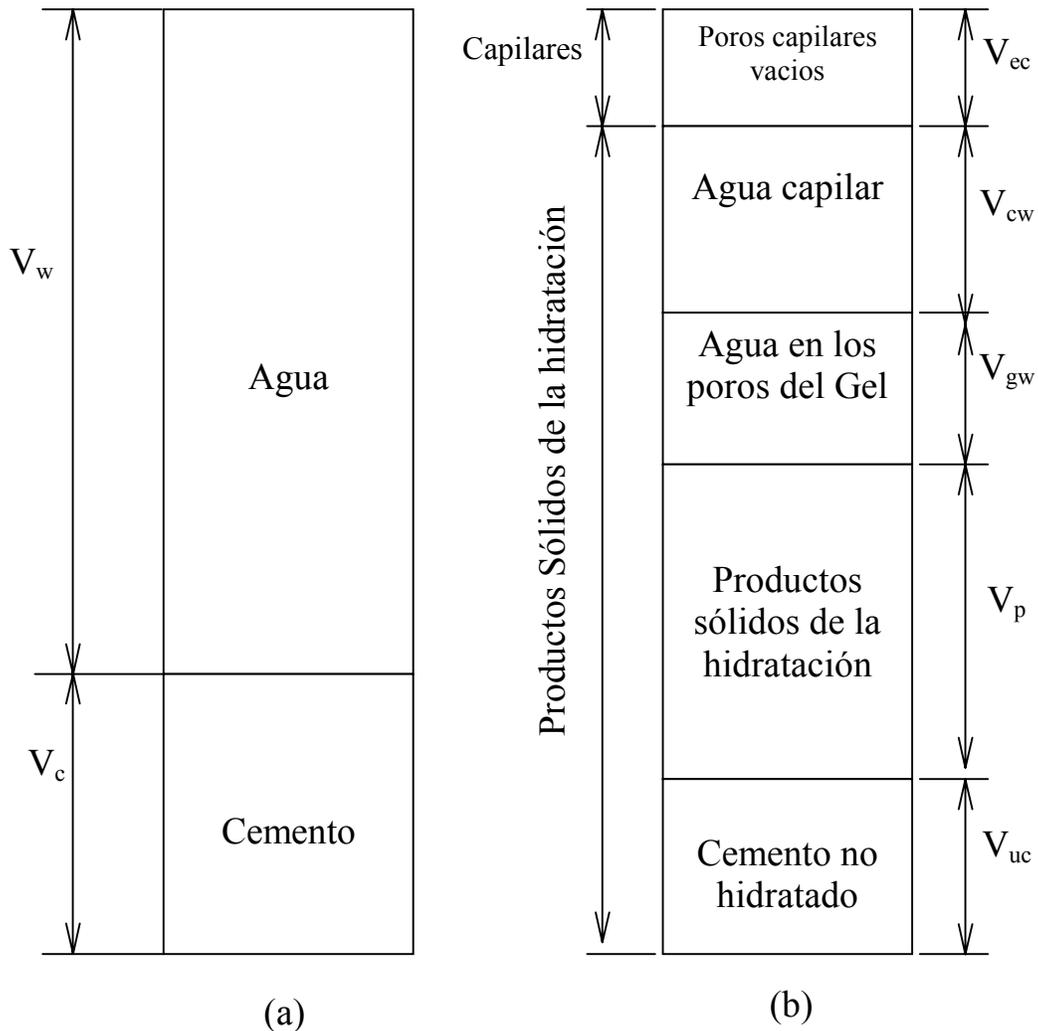


Figura 5. Representación de las proporciones volumétricas:

- a) Antes de la hidratación (grado de hidratación, 0), y
- b) durante la hidratación (grado de hidratación < 1.0).

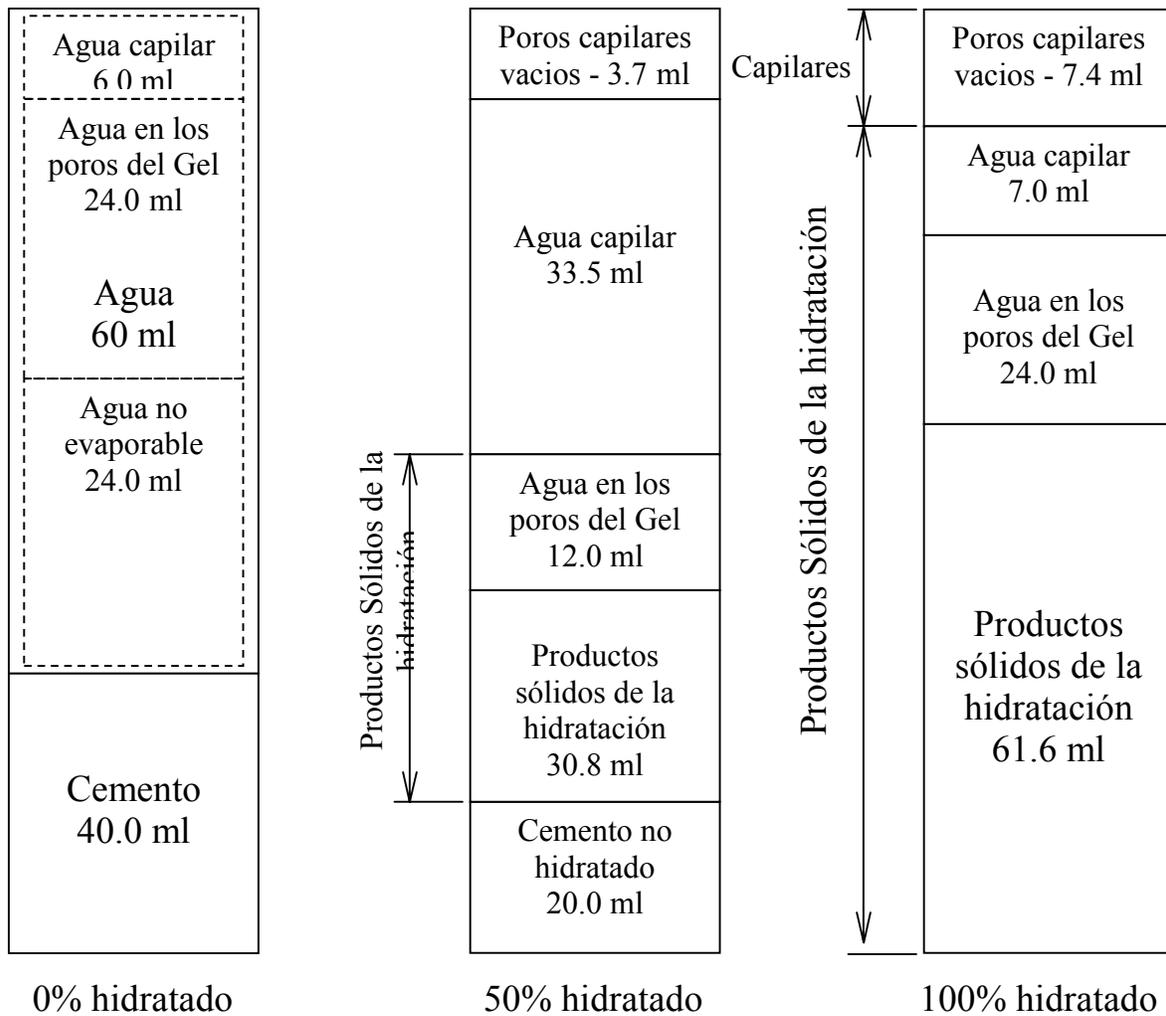
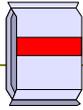
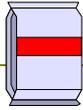
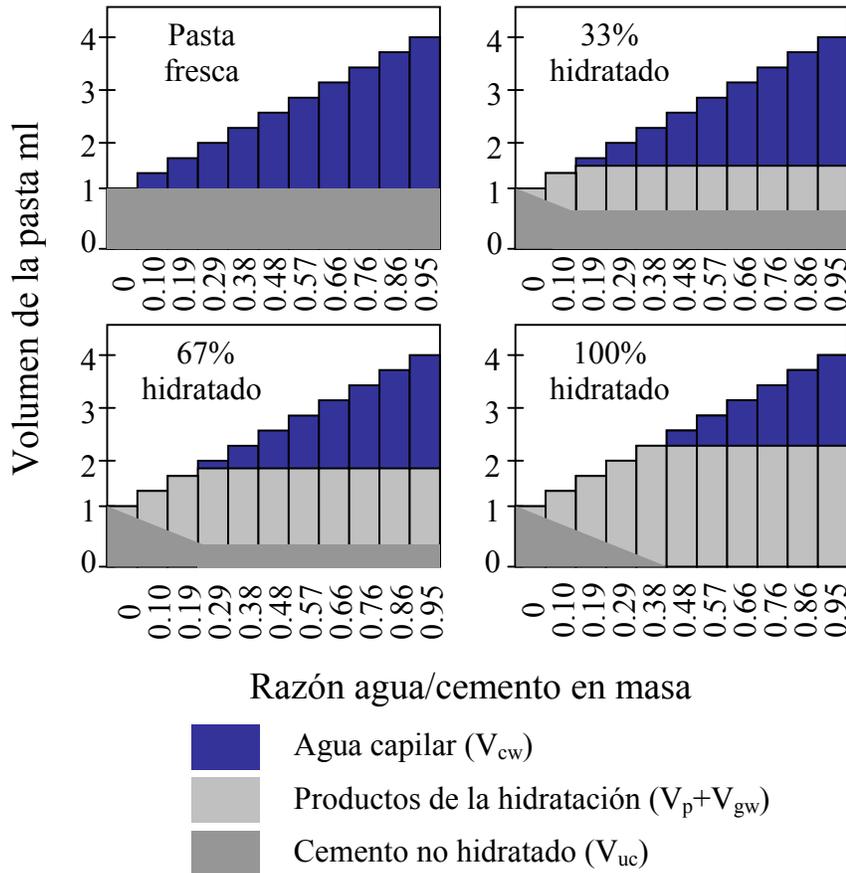


Figura 6. Representación de las proporciones volumétricas de la pasta de cemento en diferentes estados de hidratación.



Hidratación total de una probeta sellada es sólo posible cuando el agua de amasado es mayor o igual que dos veces la cantidad de agua para la reacción química

$$\Rightarrow W/C = 0,5$$



La razón W/C mínima necesaria para la hidratación total de la pasta de cemento curada bajo agua

$$W/C \geq 0,36$$

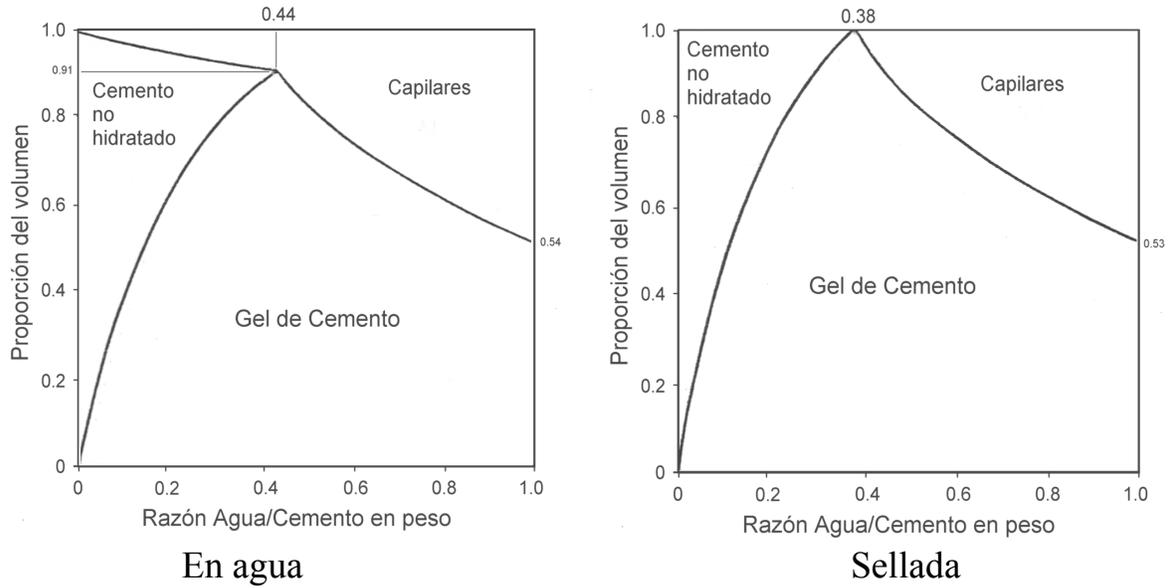
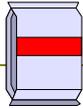


Figura 7. Composición de la pasta de cemento hidratada en el estado final de hidratación después de un prolongado almacenaje en :agua y sellada respectivamente.

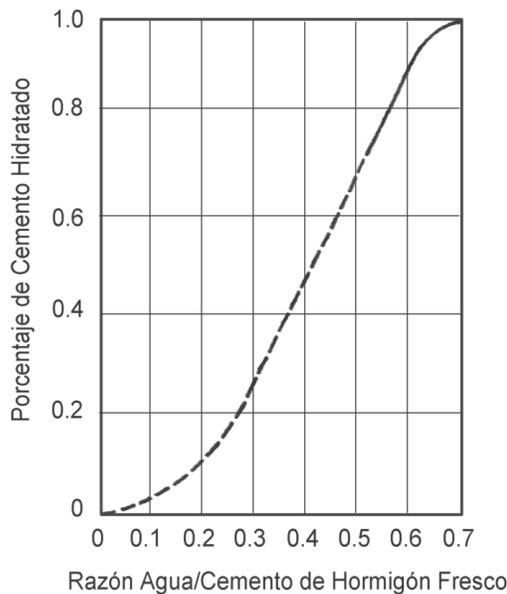
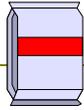


Tabla 4. Edad aproximada requerida para producir la madurez a la cual los capilares llegan a segmentarse.

Razón agua/cemento	Tiempo requerido
0.40	3 días
0.45	7 días
0.50	14 días
0.60	6 meses
0.70	1 año
sobre 0.70	imposible

Figura 8. Relación entre la razón agua/cemento y el grado de hidratación al cual los capilares dejan de ser continuos.



➤ Porosidad de la Pasta de Cemento Hidratada

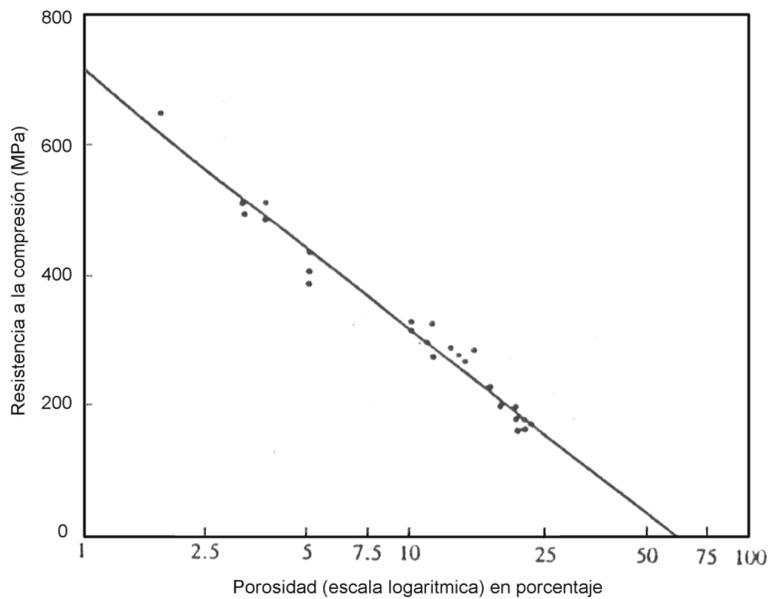
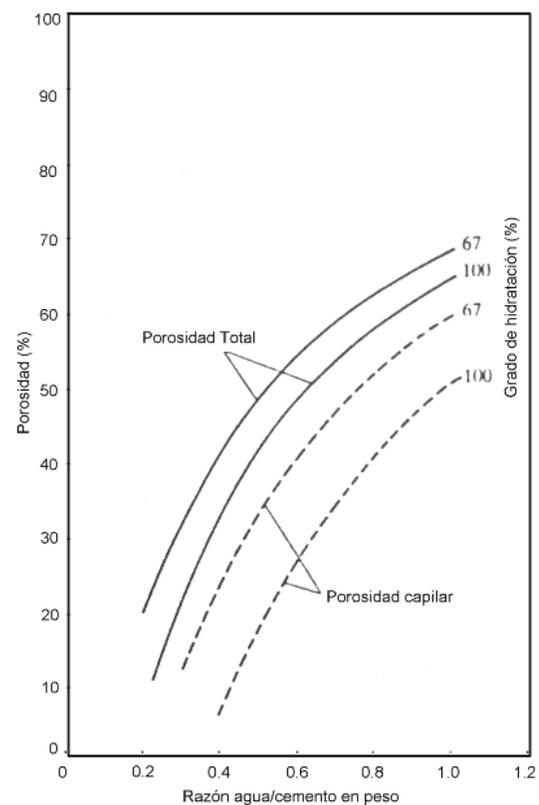
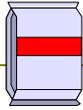


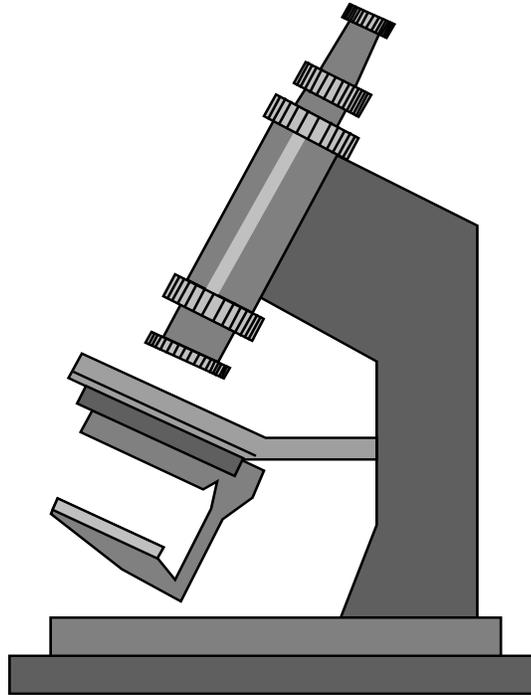
Figura 9. Relación entre la resistencia a la compresión y el logaritmo de la porosidad de la pasta de cemento compactada por varios tratamientos de presión y alta temperatura.

Figura 10. Influencia de la razón agua/cemento y el grado de hidratación sobre la porosidad total y capilar de la pasta de cemento.





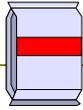
PROPIEDADES DEL CEMENTO



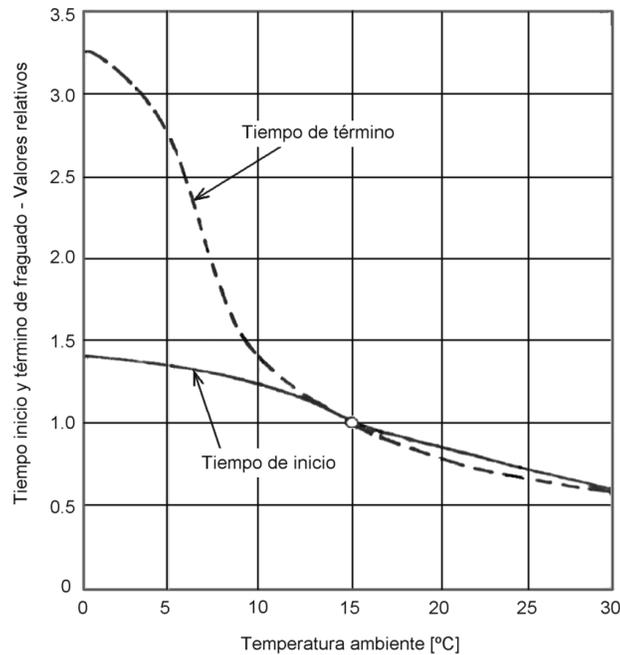
• FRAGUADO DEL CEMENTO

➤ *Rigidización de la Pasta de Cemento*

Causa :	Hidratación de C_3A y C_3S
Definición :	Inicial y final arbitraria
Efecto :	Cambios de temperatura
Inicial :	Aumento rápido de temperatura
Final :	Temperatura “peak”



Efecto temperatura:



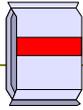
Fraguado Relámpago : Reacción C_3A

Falso Fraguado : Se produce una rigidización de la pasta de cemento en pocos minutos, después de agregar el agua. No se genera calor apreciable.

Las causas son:

- 1.- Deshidratación del yeso al mezclarse con clinker caliente
- 2.- Reacción álcalis carbonatados con $Ca(OH)_2$

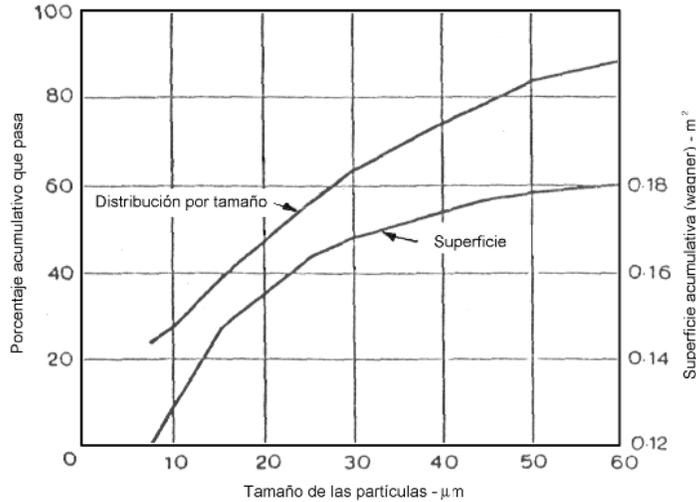
La solución es remezclar el hormigón **sin** añadir agua.



• COMPONENTES DEL CEMENTO

➤ Superficie Específica de las Partículas de Cemento

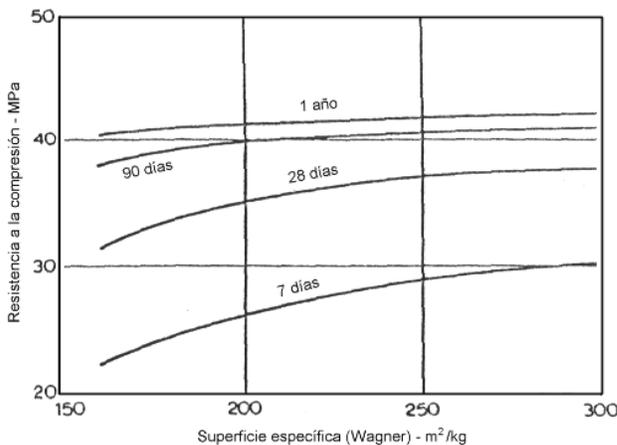
La hidratación comienza en la superficie de las partículas de cemento



Requisitos : fracción retenida en malla 90 μ m:
 < 10% CC
 < 5% CAR

Las partículas menores son de mayor importancia.

Figura 11. Ejemplo de distribución de tamaños de partículas y contribución por partículas a la superficie acumulativa para cualquier tamaño para 1 gramo de cemento. Datos obtenidos con el Turbidímetro de Wagner (sedimentación en bencina).



A mayor finura del cemento:

Aumenta velocidad de hidratación, endurecimiento y desprendimiento del calor.

Mayor costo molienda.

Mayor velocidad de deterioro a la atmósfera.

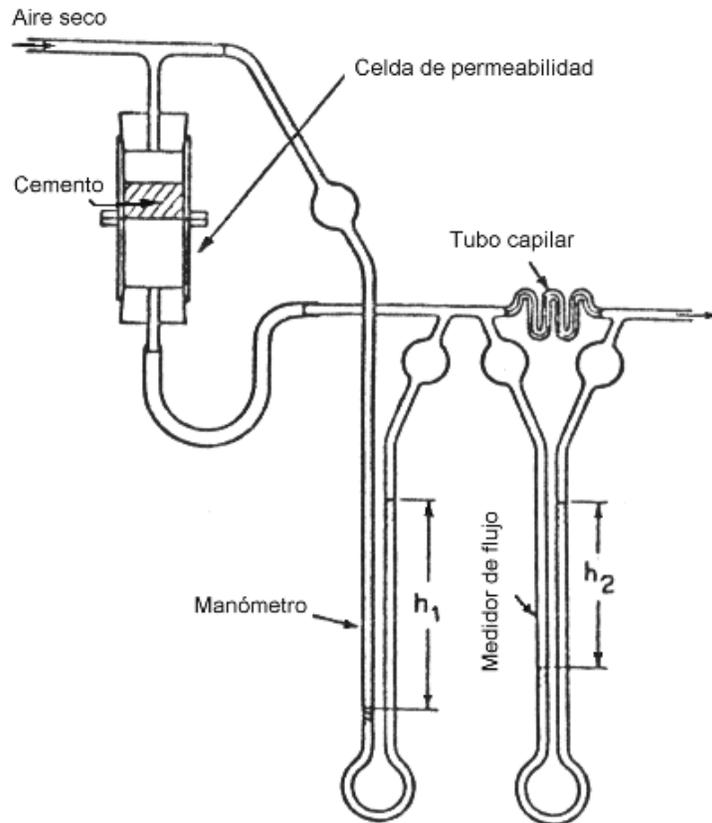
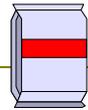
Mayor reacción álcali-árido.

Mayor retracción de la pasta (no necesariamente el hormigón).

Mayor riesgo de agrietamiento.

Mayor exudación.

Figura 12. Relación entre resistencia del hormigón a diferentes edades y la finura del cemento.



Carman

$$S_w \left[\frac{cm^2}{gr} \right] = \frac{14}{\rho(1-\epsilon)} \sqrt{\frac{\epsilon^3 Ah_1}{klh_2}}$$

$$S_w = \frac{k_1}{\rho} \sqrt{\frac{h_1}{h_2}}$$

Blaine

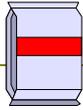
Volumen conocido de aire que pasa promedio a una presión promedio especificada.

$$S = k_2 \sqrt{t}$$

Figura 13. Aparato de permeabilidad de Lea y Nurse.(Velocidad constante)

Tabla 5. Ejemplos de superficies específicas de cemento medidas por diferentes métodos.

Cemento	Superficie específica medida por : (m ² /kg)		
	Método Wagner	Método de Lea y Nurse	Método de adsorción de nitrógeno
A	180	260	790
B	230	415	1000



• DESARROLLO DE CALOR DE LOS COMPONENTES DEL CEMENTO

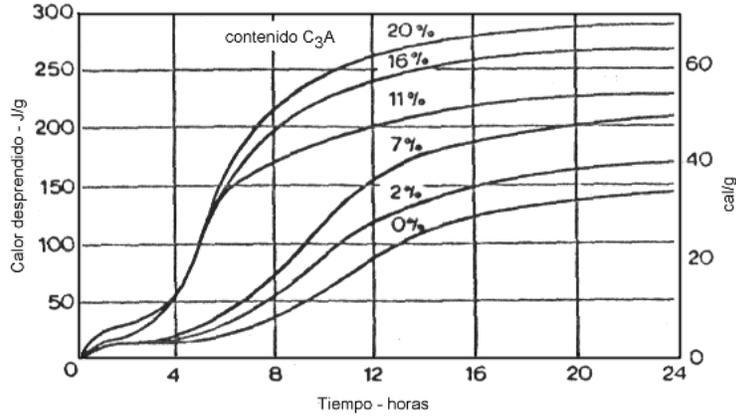


Figura 14. Influencia del contenido de C_3A en el desarrollo del calor (contenido de C_3S aproximadamente constante)

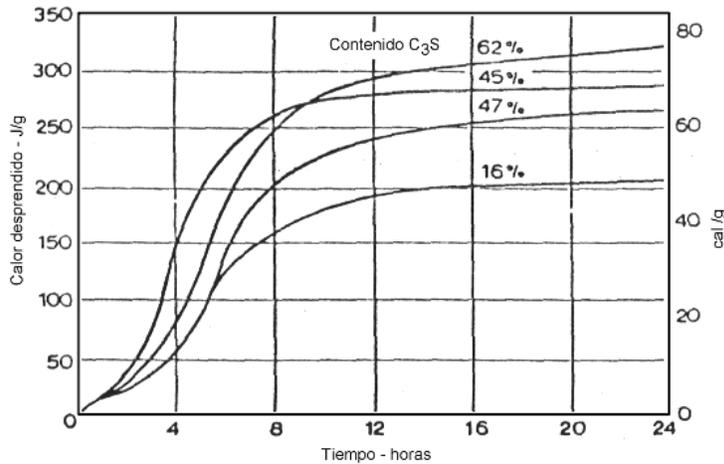
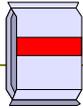


Figura 15. Influencia del contenido de C_3S en el desarrollo del calor (contenido de C_3A aproximadamente constante)



Calor de hidratación : Cantidad de calor en calorías por gramo de cemento no hidratado, desarrollado por una hidratación completa a una temperatura dada.

Componentes	Calor de hidratación	
	J/g	cal/g
C ₃ S	502	120
C ₂ S	260	62
C ₃ A	867	207
C ₄ AF	419	100

El calor de hidratación de 1 gramo de cemento :

$$\text{a 3 días} \quad \text{CH/g} = 98 (\text{C}_3\text{S}) + 20 (\text{C}_2\text{S}) + 170 (\text{C}_3\text{A}) + 29 (\text{C}_4\text{AF})$$

$$\text{a 1 año} \quad \text{CH/g} = 136 (\text{C}_3\text{S}) + 62 (\text{C}_2\text{S}) + 200 (\text{C}_3\text{A}) + 30 (\text{C}_4\text{AF})$$

La velocidad de desarrollo depende :

- Composición
- Temperatura



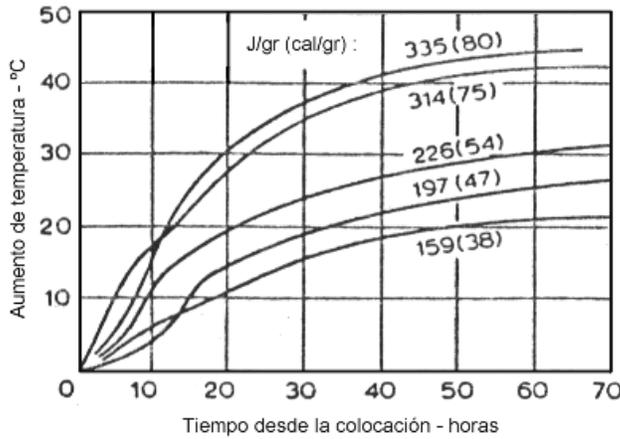
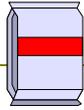


Figura 16. Aumento de temperatura en un hormigón 1:2:4 (razón agua/cemento de 0.60) hecha con diferentes cementos y curado adiabáticamente.

El calor de hidratación total de cada cemento a los tres días de muestra en cada curva.

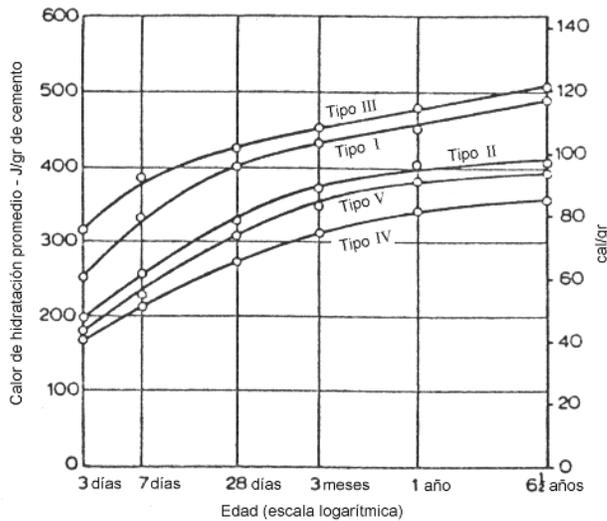


Figura 17. Desarrollo del calor de hidratación de diferentes cementos curados 21°C (razón agua/cemento de 0.40).

Tipo de Cemento	Desarrollo del calor de hidratación a :							
	4°C		24°C		32°C		41°C	
	J/g	cal/g	J/g	cal/g	J/g	cal/g	J/g	cal/g
I	154	36.9	285	68.0	309	73.9	335	80.0
III	221	52.9	348	83.2	357	85.3	390	93.2
IV	108	25.7	195	46.6	192	45.8	214	51.2

Tabla 6. Desarrollo del calor de hidratación después de 72 horas a diferentes temperaturas.

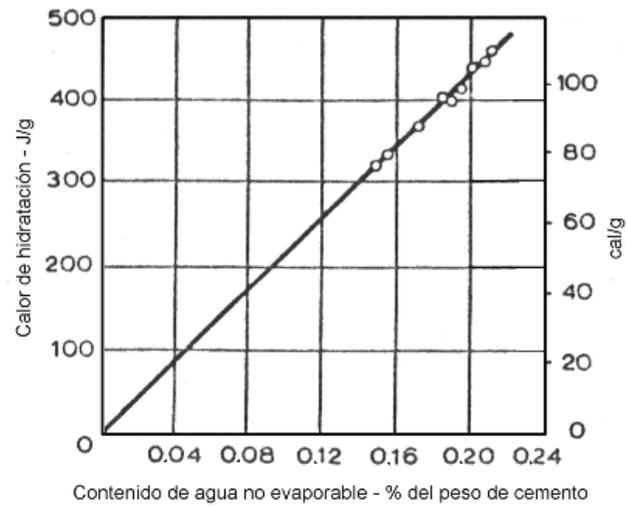
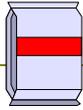
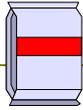


Figura 18. Relación entre el calor de hidratación y la cantidad de agua no evaporable para cemento Portland corriente.



• DESARROLLO DE RESISTENCIA

C₃S : Es el mayor contribuyente al desarrollo de la resistencia durante las primeras 4 semanas. 80% reacciona en los primeros 10 días.

C₂S : Influye sobre el aumento en resistencia de la cuarta semana en adelante. 80% reacciona en 100 días.

A alrededor de 1 año de edad los dos componentes contribuyen aproximadamente en la misma medida en la resistencia final.

C₃A : Contribuye a la resistencia de la pasta del cemento del primer al tercer día. 80% reacciona en 6 días.

C₄AF : No tiene contribución apreciable en la resistencia. 80% reacciona en 50 días.

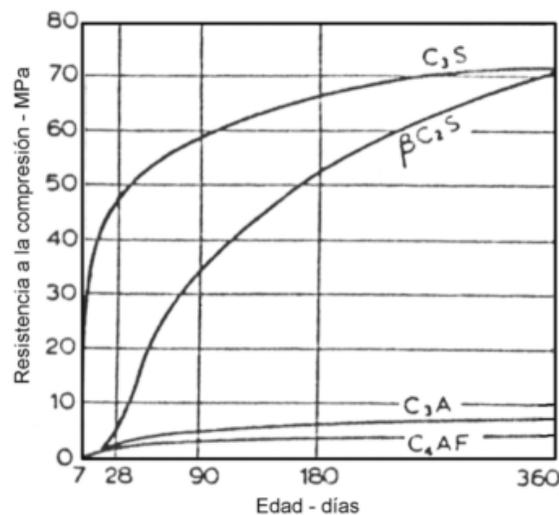


Figura 19. Desarrollo de la resistencia de los componentes puros

Conociendo las contribuciones a la resistencia de los componentes presentes individualmente se puede predecir la resistencia del cemento en base a su composición. Esto es posible usando la fórmula del tipo :

$$\text{Resistencia} = a (C_3S) + b (C_2S) + c (C_3A) + d (C_4AF)$$

donde los símbolos entre paréntesis representan los porcentajes en peso de la composición, y a, b, etc. son constantes representando la contribución en porcentaje de los respectivos componentes a la resistencia de la pasta de cemento.

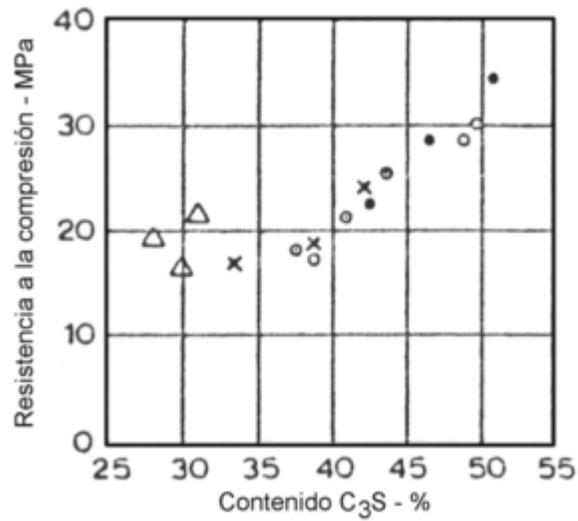
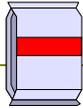


Figura 20. Relación entre la resistencia a 7 días de pasta de cemento y el contenido de C₃S en el cemento. (cada marca representa cemento de una planta)

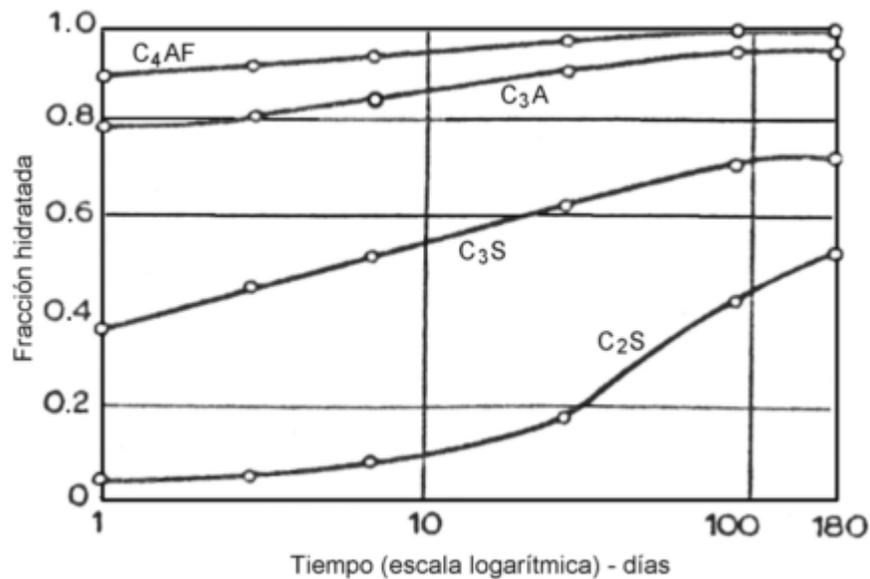


Figura 21. Razón de hidratación de los componentes puros.

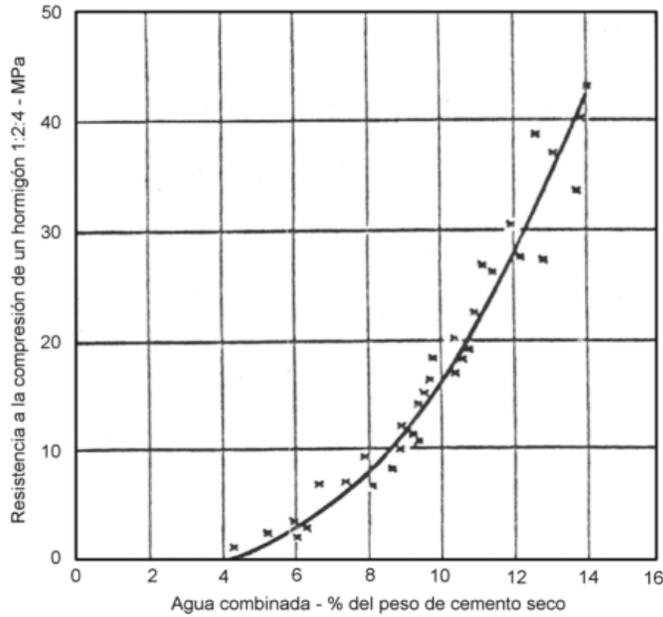
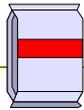


Figura 22. Relación entre la resistencia a la compresión y el contenido de agua combinada.

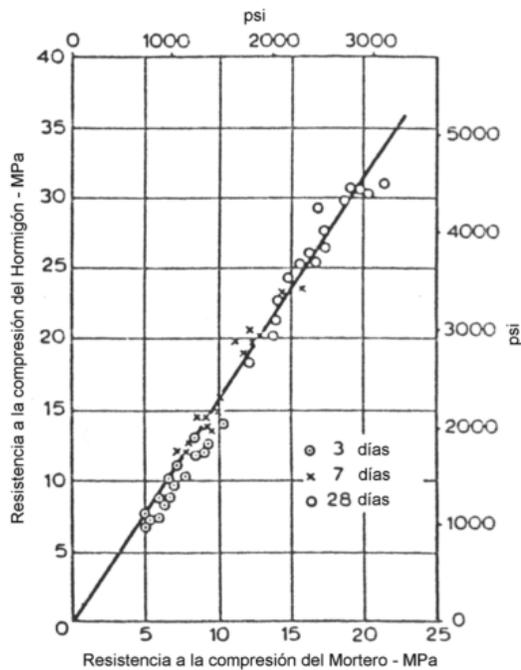
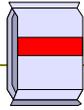


Figura 23. Relación entre la resistencia del hormigón y el mortero con la misma razón agua/cemento.



• ESTABILIDAD DE VOLUMEN

Es esencial que la pasta de cemento, una vez fraguada no sufra gran cambio de volumen.

En particular, no debe haber una expansión apreciable, la cual, bajo condiciones de esfuerzos, podrá ocasionar un rompimiento de la pasta de cemento endurecida.

Tal expansión puede tener lugar debido a una hidratación retardada o lenta, o a otra reacción de algún compuesto presente en el cemento endurecido, particularmente cal libre, magnesia o sulfato de calcio.

Expansión debida a cal libre.

Si las materias primas adicionadas al horno contienen más cal de la que puede combinarse con los óxidos acídicos, el exceso permanecerá en estado libre. Esta cal fuertemente calcinada se hidrata sólo en forma muy lenta y, puesto que la cal apagada ocupa un volumen más grande que el óxido de calcio original, se produce una expansión. Por otra parte, la cal libre presente en el clinker se intercrystaliza y sólo se encuentra parcialmente expuesta al agua durante el tiempo anterior al fraguado de la pasta.

La cal adicionada al cemento con posterioridad a su fabricación, no produce variaciones de volumen, debido a que se hidrata rápidamente, antes de que la pasta haya fraguado.

Expansión debida al MgO libre.

Reacciona de manera similar a la cal libre.

Expansión debida al Sulfato de Calcio.

Recordaremos que un hidrato de sulfato de calcio, el yeso, se adiciona al clinker del cemento para prevenir un fraguado relámpago; sin embargo, si el contenido de yeso sobrepasa la cantidad que puede reaccionar con el C_3A durante el fraguado, se presentará una variación de volumen en forma de expansión lenta. Se forma sulfo-aluminato de calcio (ettringita) cuando la pasta está endurecida, produciendo tensiones internas por expansión.

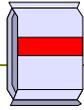
El ataque por sulfatos es debido principalmente a las expansiones que se producen en las siguiente reacciones :



(aumento de volumen xx%)



(aumento de volumen xx%)



ENSAYOS DEL CEMENTO

EN EL POLVO :

- Densidades (real)
- Finura
- Composición química

EN LA PASTA :

- Agua de consistencia normal
- Tiempo de fraguado
- Estabilidad volumétrica
- Calor de hidratación
- Poder de retención de agua

EN EL MORTERO :

- Compresión
- Flexotracción
- Deformaciones o cambios volumétricos

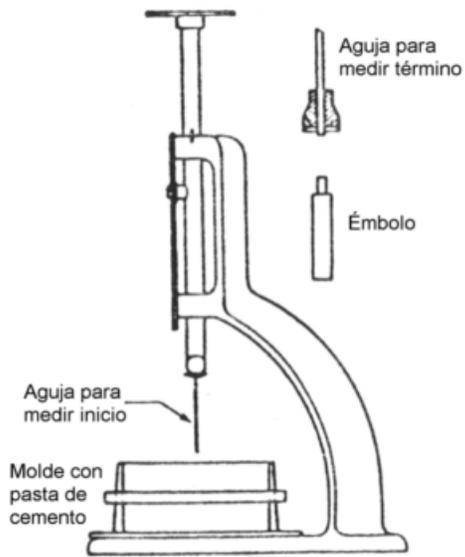
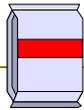


Figura 24. Aparato de Vicat

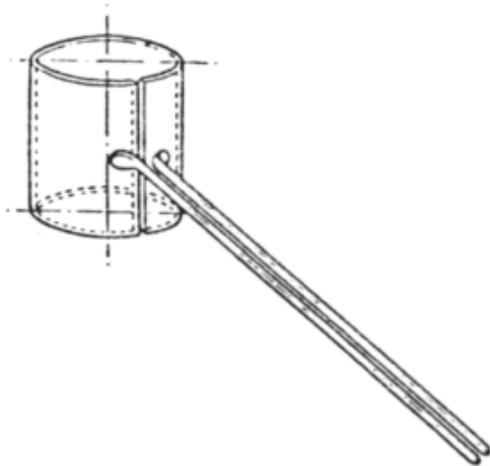
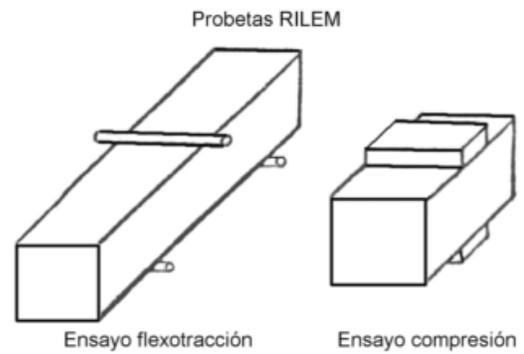
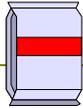


Figura 25. Aparato de Le Chatelier





CLASIFICACIÓN DE LOS CEMENTOS PORTLAND

• SEGÚN SU COMPOSICIÓN QUÍMICA (ASTM)

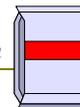
CEMENTO	CALOR		COMPOSICIÓN POTENCIAL			
	24 °C	32 °C	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
1. Normal	68	74	42	23	13	8
2. Rápido			48	24	15	6
3. Súper	83	85	53	20	11	9
4. Bajo calor	47	46	28	45	8	9
5. Calor moderado			32	36	12	9
6. Res. sulfatos			45	29	5	15

➤ *Calor de Hidratación de los Componentes del Cemento*

C3A	207	cal/gr
C3S	120	cal/gr
C4AF	100	cal/gr
C2S	62	cal/gr

COMPONENTES PELIGROSOS

Cal	C ₂ O	se limitan porque producen...
Magnesia	MgO	expansiones



FÁBRICAS NACIONALES

Cemento Melón	1.400.000 ton/año
Cemento Polpaico	1.300.000 ton/año
Inacesa - Bío Bío - Teno	400.000 ton/año

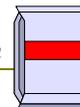
CEMENTOS COMERCIALES EN CHILE

Clase	Composición	Marca	Grado
Portland	Clínquer	Súper Melón	Alta resistencia
Portland Puzolánico	Clínquer y hasta un 30% de puzolana	Melón Especial Polpaico Especial Melón Eextra Polpaico 400 Inacesa Alta Resist.	Corriente Corriente Alta resistencia Alta resistencia Alta resistencia
Puzolánico	Clínquer y 30% a 50% de puzolana	Inacesa Especial	Corriente
Siderúrgico	Clínquer y 30% a 75% de escoria de alto horno	Bío Bío especial Bío Bío alta resist.	Corriente Alta resistencia

GRADOS DE CEMENTOS. según norma NCh 148 Of 68

GRADO	TIEMPO DE FRAGUADO		RESISTENCIA			
	inicial mín.	final hrs	COMPRESIÓN		FLEXIÓN	
			7 días MPa	28 días MPa	7 días MPa	28 días MPa
CORRIENTE	60	12	18	25	3,5	4,5
ALTA RESISTENCIA	45	10	25	35	4,5	5,5

NOTA: LA RESISTENCIA SE DETERMINA EN MORTEROS NORMALIZADOS

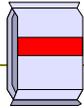


• REQUISITOS QUÍMICOS PARA CEMENTOS

MÁXIMOS (%)	Portland	Siderúrgicos		Puzolánico	
		Portland Siderúrgicos	Siderúrgicos	Portland Puzolánico	Puzolánico
Pérdida por calcinación	3,00	5,00	5,00	4,00	5,00
Residuo insoluble	1,50	3,00	4,00	30,00	50,00
Contenido de SO₃	4,00	4,00	4,00	4,00	4,00
Contenido de MgO	5,00	-	-	-	-
Contenido de Mn₂O₃	-	2,00	2,00	-	-

• TIPOS DE CEMENTOS NORMALIZADOS POR LAS NORMAS CHILENAS

Denominación	Categorías de Resistencias	Proporción de los constituyentes			
		Clínker	Puzolana	Escoria	Tipo A
Portland	180/250-250/350	100%	--	--	--
Portland con agregados:					
- Tipo A	180/250-250/350	> 70%	--	--	< 30%
- Puzolánico	180/250-250/350	> 70%	< 30%	--	--
- Siderúrgico	180/250-250/350	> 70%	--	< 30%	--
Cemento con agregados.					
- Tipo A	180/250-250/350	50 - 70%	--	--	30 - 50%
- Puzolánico	180/250-250/350	50 - 70%	30-50%	--	--
- Siderúrgico	180/250-250/350	25 - 70%	--	30-75%	--
Cemento con fines especiales		No especificado			



• CARACTERÍSTICAS DE LOS CEMENTOS Y ENSAYOS NORMALIZADOS

Ensayo	Especificaciones		Valores habituales
	Norma	Valor	
Peso específico	NCh154	C.Portland ≥ 3.0 kg/dm ³	CC : 3.0 kg/dm ³ CAR : 3.1 kg/dm ³ (3)
Tiempo de fraguado	NCh152	comienzo : CC > 60 min CAR > 45 min	de 1h 30min a 3h 40min
Consistencia normal	NCh151	término : CC < 12 h CAR < 10 h	de 2h 30min a 6h (26 a 33% peso cemento)
Finura :			Portland 3000-3500 cm ² /kg Portland Puzolánico
- Sistema Blaine	Nch159	(1)	4000-5000 cm ² /kg CC 3500-4000 cm ² /kg CAR 4000-4500 cm ² /kg
- Sistema Wagner	NCh149	(1)	½ valor Blaine
- Tamizado	NCh150	(1)	-
Resistencia :			
C. corriente	NCh158	R7 = 180/35 R28 = 250/45	R7 = 250/55 R28 = 380/78
C. alta resistencia		R7 = 250/45 R28 = 350/45	R7 = 350/75 R28 = 530/90
Calor de hidratación :			
- Disolución	ASTM C185	(2)	-
- Thermos	-	(2)	CC : 65-70 cal/gr CAR : 70-80 cal/gr
Expansión autoclave	NCh157	máximo 1%	1%

Notas:

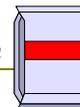
La norma no especifica valores.

La norma ASTM especifica la medición del calor de hidratación mediante un ensayo por disolución en ácido fluorhídrico. Existe un ensayo alternativo (Botella Thermos), no normalizado, que mide directamente el calor desprendido en un ambiente de temperatura constante y que es más aplicable a los cementos nacionales, en especial si contienen agregado de puzolana o escoria.

En este último ensayo, los valores que se obtienen oscilan generalmente alrededor de 60 a 70 cal/gr para los cementos corrientes, 70 a 80 cal/gr para los de alta resistencia y sobre 80 para los cementos Portland puros. Los primeros deben ser preferidos para obras masivas. (7 días)

Peso específico : clínquer : 3.15 ; Puzolana : 2.6-2.7 ; Escoria : 2.7

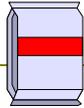
Para que puzolana sea activa debe molerse previamente a finura ≥ 7000 cm²/kg



Clasificación Inglesa		Clasificación Americana	
Descripción	BS	Descripción	ASTM
Portland corriente	12 : 1978	Tipo I	C150-84
Portland alta resistencia	12 : 1978	Tipo III	C150-84
Portland de muy alta resistencia a temprana edad	-	-	-
Portland de bajo calor	1370 : 1979	Tipo IV	C150-84
Cemento modificado	-	Tipo II	C150-84
Portland resistente a sulfatos	4027 : 1980	Tipo V	C150-84
Portland siderúrgico (escoria alto horno)	146 : Parte 2: 1973	Tipo IS	C595-83a
Portland siderúrgico de bajo calor	4246 : parte 2 : 1974	Tipo IS(MS)	-
Portland blanco	12 : 1978	-	C150-84
Portland puzolánico	4627 : 1970	Tipo IP	C595-83a
	6588 : (borrador)	Tipo P	
	3892 : Parte 1:1982	Tipo I(PM)	

Tabla 7. Tipos principales de cementos Portland

Nota : Cementos tipo I, IS, IP, P, I(PM) II y II están también disponibles con agregados incorporadores de aire, y son denotados por la letra A, ejemplo Tipo IA.



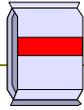
Cemento	Composición de los compuestos (%)							
	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	CaSO ₄	CaO libre	MgO	pérdida en el encendido
Tipo I	59	15	12	8	2.9	0.8	2.4	1.2
Tipo II	46	29	6 (8 máx)	12	2.8	0.6	3.0	1.0
Tipo III	60	12	12 (15 máx)	8	3.9	1.3	2.6	1.9
Tipo IV	30 (35 máx)	46 (40 mín)	5 (7 máx)	13	2.9	0.3	2.7	1.0
Tipo V	43	36	4 (5 máx)	12	2.7	0.4	1.6	1.0

Valores promedios típicos de la composición de los cementos Portland de distintos tipos.

Los valores entre paréntesis son los límites especificados por ASTM C150-84.

Edad días	Resistencia mínima a la compresión							
	Mortero				Hormigón			
	Portland corriente		Portland alta resistencia		Portland corriente		Portland alta resistencia	
	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi	MPa	psi
3	23	3300	29	4200	13	1900	18	2600
28	41	5900	46	6700	29	4200	33	4800

BS 12 : 1978 Requisitos de resistencia de los cementos.



CONTROL DE CALIDAD DEL CEMENTO

• ENSAYOS DE APTITUD

El cemento cuenta con control de calidad de producción, por lo cual los ensayos de verificación inicial sólo deben ejecutarse para el estudio de la dosificación. Los cementos especificados están destinados a determinar la calidad del cemento para ser apto para la construcción de pavimentos de hormigón.

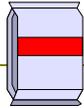
Los ensayos pueden ser parte de la certificación oficial de la Fábrica de Cemento.

• ENSAYOS DE HOMOGENEIDAD

Aprobado el tipo de cemento, corresponde en la segunda fase sólo verificar su homogeneidad ensayando cada partida.

Para tal efecto se recomienda guardar una bolsa de cemento seleccionada al azar de las que lleguen en un día. Escribir en el saco la fecha de llegada a obra. Esta muestra se guardará en obra hasta estar seguros de que existen problemas de hormigón en faena. Se recomienda una vez por semana extraer una muestra de 10 kg de una de las bolsas anteriores y enviarla a un Laboratorio Oficial, debidamente identificada con nombre de la obra y fecha de llegada. Con el objeto de verificar la homogeneidad del cemento se recomienda realizar periódicamente al menos los ensayos de resistencia, superficie específica y tiempo de fraguado.

En terreno es importante controlar además el almacenamiento y forma de consumo y la temperatura máxima del cemento al llegar a obra ($<70^{\circ}\text{C}$). Este último ensayo será realizado por el laboratorio de terreno.



➤ *Variaciones de R_{28} del Cemento Especial*

		N=62 2° TRIM '80	N=69 3° TRIM '80
R_{28}	Valor medio	409	407
	Valor mínimo	359	346
	Valor máximo	447	477
SUP. ESP	Valor medio	3900	4000
	Valor mínimo	3750	3900
	Valor máximo	4100	4100

		N=8	N=4
R_{28}	Valor medio	530	530
	Valor mínimo	517	515
	Valor máximo	551	544
SUP. ESP	Valor medio	4700	4800
	Valor mínimo	4600	4600
	Valor máximo	4850	5050

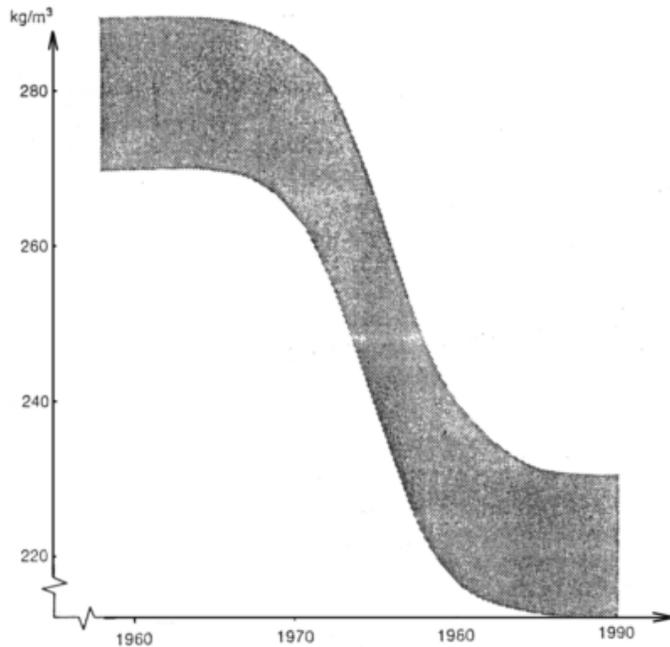
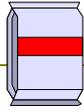


Figura 26. Revisión de las normas oficiales Suecas para el contenido de cemento en el hormigón (resistencia grado 25 Mpa) como un resultado de las mejoras en el control de calidad de los hormigones ready-mix.

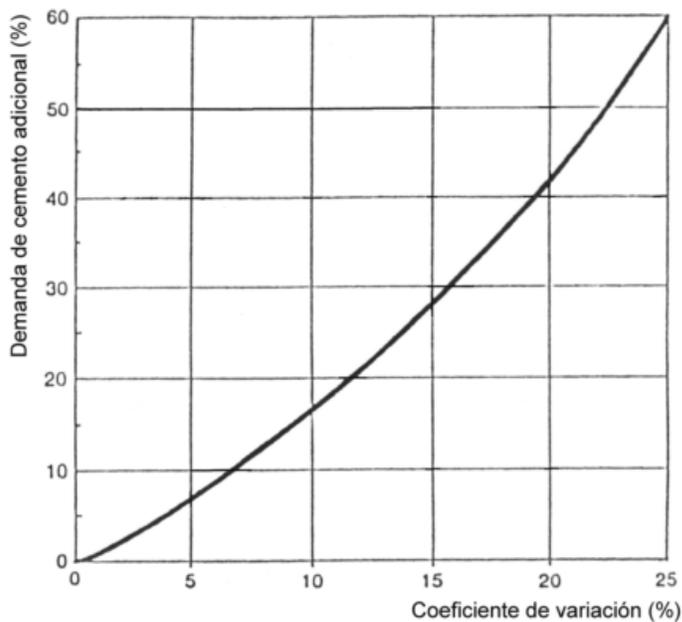


Figura 27. Efecto del coeficiente de variación en la resistencia del hormigón en la cantidad de cemento adicional requerido, comparado a un cemento sin ninguna variación.

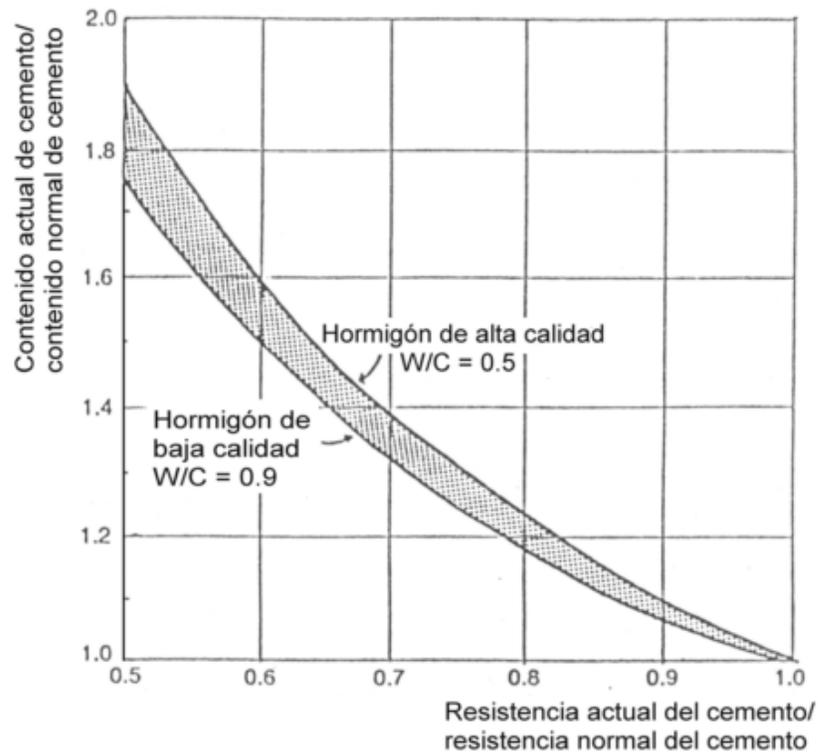
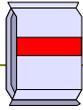
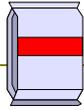


Figura 28. Efecto de la resistencia del cemento en el contenido de cemento requerido en el hormigón.



RESUMEN CEMENTOS

1. Fabricación permite variar características cemento:

- a. Proporción cal/arcilla
- b. Finura
- c. Proporción adiciones

2. Fraguado y endurecimiento pasta cemento

- a. Reacción exotérmica
- b. Variaciones de volumen

3. Clasificación cementos nacionales

4. Ensayos para verificación características

- a. Forma general de ejecución
- b. Limitaciones y validez



AGUA



INDICE AGUA

ROL DEL AGUA EN EL HORMIGÓN	3
• USOS DEL AGUA EN LA FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN	3
DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN LA ESTRUCTURA INTERNA DEL HORMIGÓN	4
CALIDAD DEL AGUA	5
• ENSAYOS DE APTITUD	5
• ENSAYOS DE HOMOGENEIDAD	5
• CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA CONDICIONA EL DESARROLLO DE 5	
• REQUISITOS BÁSICOS	6
IMPUREZAS DEL AGUA	7
ANTECEDENTES PARA LA EVALUACIÓN DEL USO DEL AGUA PARA HORMIGONES	8
• SITUACIÓN EN CHILE:	8
• CRITERIOS GENERALES	8
ALMACENAMIENTO DEL AGUA	9

ROL DEL AGUA EN EL HORMIGÓN

Otorga **TRABAJABILIDAD** necesaria al hormigón :

Define su **FLUIDEZ** (cono)

Participa en proceso de **HIDRATACION** del cemento

• USOS DEL AGUA EN LA FABRICACIÓN DEL HORMIGÓN

DOSIS DE AGUA EN EL HORMIGÓN FRESCO

Principal factor porque aumenta lubricación entre partículas.

Dosis de agua depende fundamentalmente de: tamaño máx. del árido.

Forma de granos (sup. Específica)

AGUA DE AMASADO

Lubrica la mezcla

Da propiedades de plasticidad al hormigón en estado fresco

El exceso de agua de amasado → Actúa como retardador y
Afecta la resistencia mecánica

AGUA DE CURADO

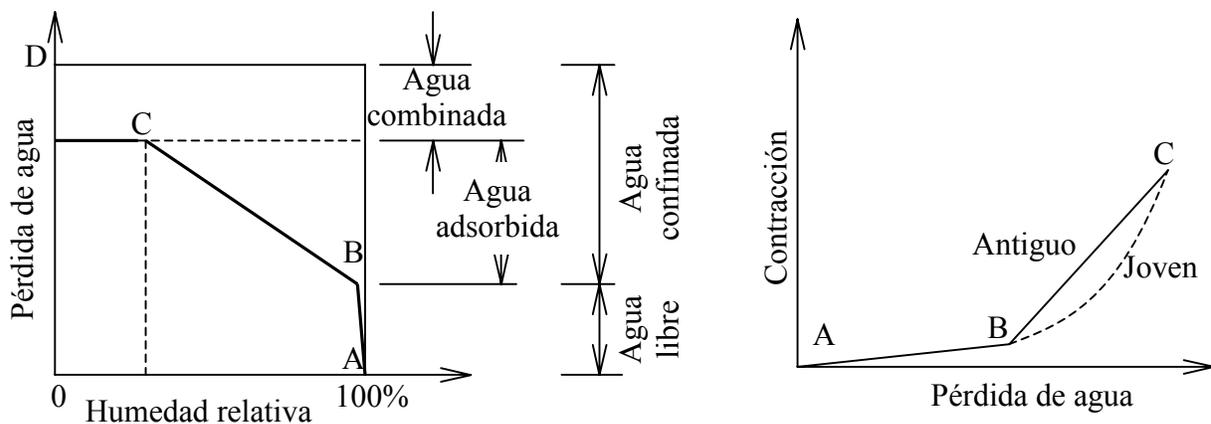
Hidrata al aglomerante: participa en procesos de fraguado y endurecimiento

AGUA DE AMBIENTE O DE SERVICIO

Finalidad: mantener un ambiente saturado para el hormigón (evitar escape de agua del interior del hormigón)

DISTRIBUCIÓN DEL AGUA EN LA ESTRUCTURA INTERNA DEL HORMIGÓN

- Química:** Reacciona con los componentes compuestos anhidros del cemento = 40 a 60 % ACN
ACN ≈ 23 a 30 % peso cemento
→ 9 a 18 % peso del cemento
60 a 110 lt/m³
- Absorción (Zeolítica):** Rellena porosidades o capilares del interior de los granos = 2 % peso arena
0,5 % peso grava
→ 20 a 40 lt/m³
- Adsorción:** Cubre granos de cemento y áridos. Delgada lámina fuertemente adherida = 20 a 30 lt/m³
- Libre:** Entre los granos satura huecos del granulado, circula y se pierde fácilmente = 20 a 30 lt/m³



- Pérdida de agua como función de la humedad relativa
- Contracción de un mortero de cemento como función del agua perdida.

CALIDAD DEL AGUA

NORMA NCh 1498

• ENSAYOS DE APTITUD

Se realizará un análisis completo de aptitud a cada tipo de agua no potable que se utilice como agua de amasado, para comprobar el cumplimiento de las condiciones establecidas en la norma NCh 1498, para lo cual se debe enviar una muestra de agua de tamaño de unos 2 litros a un laboratorio oficial.

• ENSAYOS DE HOMOGENEIDAD

Una vez aprobada, no es necesario realizar nuevos ensayos si se tiene la seguridad que no han variado las características del agua. Se realizarán análisis adicionales en caso que se cambie de fuente de suministro, cuando se estime oportuno por provenir el suministro de pozos con niveles freáticos fluctuantes o de ríos con aporte variable, o que una o varias impurezas estén en el límite de la aceptación. Estos ensayos se realizarán en un laboratorio oficial.

• CANTIDAD Y CALIDAD DEL AGUA CONDICIONA EL DESARROLLO DE

- Propiedades en estado fresco
- Propiedades en etapa de endurecimiento
- Durabilidad del hormigón endurecido.

• REQUISITOS BÁSICOS

1. Agua potable permitida
2. Uso de agua de mar en hormigones $R < 150 \text{ Kg/cm}^2$. Salvo en hormigón pobre. No utilizar en el curado.
3. Potencialmente nocivos:

Cuidado con los sulfatos, cloruros, carbobatos, iodatos, fosfatos, arseniatos y boratos, especialmente si están asociados con sodio, potasio, magnesio, fierro o cobre.

Cuidado con alcohol, algas, productos orgánicos, ácido láctico y tánico.

Aguas puras de cordillera o lluvia son agresivas, pues disuelven la cal de los hormigones; producen una pérdida de impermeabilidad y protección del acero.

Aguas de mar sólo se pueden utilizar en hormigones simple no utilizables estructuralmente.

No puede usarse agua con azúcares (sacarosa, glucosa, etc.). Un kilogramo de azúcar en un camión mixer hace que ese hormigón no fragüe, nunca más.

4. El ataque de impurezas se agrava con mayor temperatura.

La norma es para casos normales. Si mediante pruebas y análisis se demuestra que los elementos a usar son mejores, se puede usar sin la norma.

En la cordillera, por ejemplo, el agua tiene un pH bajo debido a la presencia de NH_3 , que es un fertilizante y plastificante. Entonces, para subir el pH (3,8 a 7) se utiliza 3 g de cemento (1,3 g de cal) por cada m^3 de hormigón.

IMPUREZAS DEL AGUA

1. En caso de aguas desconocidas, hacer un **Análisis Químico**

pH	6 a 9,2
Sólidos en suspensión	< 2.000 mg/l
Sólidos disueltos	< 15.000 mg/l

2. Si los sólidos disueltos > 5.000 mg/l

Cloruros	< 1.200 g Cl/m ³ para hormigón armado < 250 g Cl/m ³ para hormigón pretensado
Sulfatos	< 600 g SO ₂ /m ³
Materias orgánicas	< 5 mg/l

Más suciedad en el agua implica mayor uso de cemento, por lo que se recomienda siempre hacer hormigones de prueba. La materia orgánica debe probarse.

Pueden afectar la **DURABILIDAD** del hormigón endurecido, a través de :

- Interferir el fraguado del cemento
- Afectar adversamente la resistencia
- Deteriorar su apariencia (manchas)
- Provocar corrosión de armaduras

Las impurezas actúan como un grano más cuando están sueltas. Llenan los huecos y aumentan la densidad, aunque no mucho, porque no lo hacen en forma suficiente como para separar los granos.

ANTECEDENTES PARA LA EVALUACIÓN DEL USO DEL AGUA PARA HORMIGONES

• SITUACIÓN EN CHILE:

Zona Norte

Escasez de agua
Posibilidad de aguas salobres
Los áridos se ventean

Zona Central

En general son aceptables
Sedimentos abundantes en época de crecidas de invierno y deshielos de primavera

Zona Sur

En general aceptables
Posible presencia de materias orgánicas.

• CRITERIOS GENERALES

1. Agua potable: normalmente posible de usar
2. Análisis químico en casos dudosos
3. Ensayo comparativo de resistencia

Una buen criterio para evaluar la calidad del agua consiste en fabricar morteros de prueba y medir su resistencia a una edad superior a 90 días y comparar el resultado con un mortero equivalente con agua destilada a la misma edad. Se acepta que la resistencia obtenida sea superior al 95% de la resistencia usando agua destilada.

Mortero agua destilada : R1
Mortero agua en estudio : R2
A.S.T.M.: aceptable si $R2 / R1 > 0,95$

ALMACENAMIENTO DEL AGUA

OBJETIVO

- Evitar contaminación del agua.
- Evitar congelamiento del agua.
- Evitar calentamiento del agua, disminuyendo la temperatura del hormigón.

RECOMENDACIONES

- El depósito destinado a contener o almacenar agua debe ser no contaminante y debe protegerse para no contaminarla.
- El depósito debe limpiarse periódicamente; mínimo una vez por semana.
- Los depósitos deben protegerse de las condiciones de clima extremas.



ARIDOS





INDICE

ÁRIDOS PARA HORMIGONES	4
➤ Ventajas Técnicas del uso de Áridos en Hormigón	5
CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS ÁRIDOS	6
POR DIMENSIONES O TAMAÑO	6
• POR DENSIDAD REAL	7
• POR ORIGEN (MÉTODO DE PRODUCCIÓN)	8
• POR TIPO DE YACIMIENTO	8
• POR FORMA Y TEXTURA	9
• POR ORIGEN GEOLÓGICO DE YACIMIENTOS	9
• POR CLASIFICACIÓN PETROGRÁFICA	9
ESTRUCTURA DE LAS PARTÍCULAS DEL ÁRIDO	10
• PARTÍCULA	10
ÁRIDO	10
• ESTADOS DE HUMEDAD DE LOS ÁRIDOS	12
CONSTANTES FÍSICAS DE LOS ÁRIDOS	13
• DENSIDAD V/S PESO ESPECÍFICO	14
• ABSORCIÓN	16
• HUMEDAD	16
• ESPONJAMIENTO DE LAS ARENAS	18
• COMPACIDAD	20
• HUECOS	20
• LEYES DE LA COMPACIDAD	21
• SUPERFICIE ESPECÍFICA	22
CONDICIONES QUE DEBEN CUMPLIR LOS ÁRIDOS	25
• CONDICIÓN DE GRANULOMETRÍA	26
➤ Métodos de proporcionamiento de los áridos	40
• CONDICIÓN DE TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO (FAURY)	50
• CONDICIÓN DE CONTENIDO DE GRANOS FINOS	53
• CONDICIÓN DE POROSIDAD	56



• CONDICIÓN DE FORMA Y TEXTURA DE LOS GRANOS	57
• CONDICIÓN DE RESISTENCIA INTRÍNSECA	64
➤ Condición de Resistencia a la Ruptura de Muestras de Roca	64
➤ Comportamiento del árido en el hormigón	64
➤ Condición de Resistencia del Árido a Granel	65
➤ Condición de Partículas Blandas y Desmenuzables.	70
➤ Adherencia.	72
• CONDICIÓN DE ESTABILIDAD	73
➤ Estabilidad Química	73
➤ Estabilidad Física	76
• REQUISITOS GENERALES NORMA NCh 163	79



ÁRIDOS PARA HORMIGONES

Función : Esqueleto inerte del hormigón (65-75% del volumen).

Constitución : Material granular formado por partículas de tamaño variable.

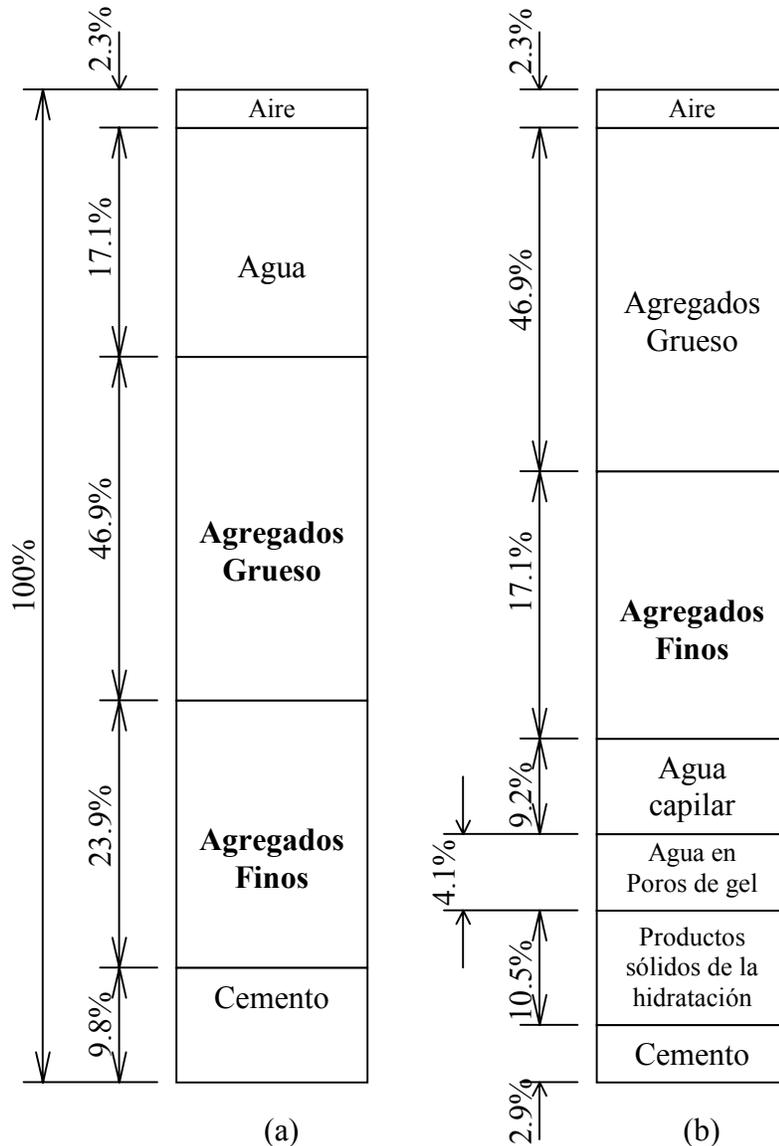


Figura 1. Proporciones volumétricas del hormigón en una mezcla de proporciones 1:2:4 en peso con razón agua/cemento de 0.55 y aire incorporado de 2.3%:

- Antes de la hidratación, y
- Cuando el grado de hidratación es 0.7.



➤ *Ventajas Técnicas del uso de Áridos en Hormigón*

- Economía
- Mayor estabilidad de volumen
- Mejor durabilidad que pasta de cemento hidratada

Importancia de su Calidad

Propiedades del Árido		Afectan las Propiedades del Hormigón	
Físicas :	Peso específico Forma y textura	Peso propio Trabajabilidad	Estado Fresco (Trabajabilidad) Estado Endurecido (Comportamiento estructural) Durabilidad (desgaste, estabilidad)
Mecánicas :	Rigidez(E) Resistencia	Deformaciones Resistencia	
Químicas :	Sílice amorfa Materia orgánica	Reacción álcali-árido Tiempo de fraguado	
Térmicas :	Coefficiente de dilatación térmica	Coefficiente de dilatación térmica Resistencia al fuego	



CLASIFICACIÓN GENERAL DE LOS ÁRIDOS

• POR DIMENSIONES O TAMAÑO

{	Árido Grueso :	
	BOLÓN	(80mm < D)
	GRAVA	(20mm < D < 40mm)
{	GRAVILLA	(5mm < D < 20mm)
	Árido Fino :	
	ARENA	(0,08mm < D < 5mm)
	FINOS	(D < 0,08mm)
	{Limos	(0,02mm < D < 0,06mm)
{Arcillas	(D < 0,02mm)	

En Hormigones Pobres : se puede usar árido integral (arena y grava mezcladas en proporciones no definidas).

En Hormigones de Buena Calidad : Es necesario dividir los áridos en a lo menos 2 fracciones (arena y grava). Esto permite un mejor estudio de la dosificación y mejor medición durante la fabricación. Para áridos de diámetro nominal mayor a 50mm es necesario separar el árido grueso en más de 2 fracciones.



• POR DENSIDAD REAL

Liviano	< 2.000	kg/m ³
Normal	2.000 a 3.000	kg/m ³
Pesado	> 3.000	kg/m ³

Tipo	Agregado		Hormigón		
	Tipo	Densidad aparente suelta (kg/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a la compresión típica (MPa)	Conductividad térmica (Jm/m ² s°C)
Liviano	Piedra pómez	700	1000	18	0,5
	Arcillas expandidas	400	1600	25	0,6
Normal	Granito	1400	2400	35	1,5
	Caliza				3,5
Pesado	Barita				
	Mineral de hierro	2500	3400	45	1,4



• POR ORIGEN (MÉTODO DE PRODUCCIÓN)

PROCESO:

NATURALES: (RODADOS) $\left\{ \begin{array}{l} \text{ABRASIÓN} \\ \text{INTERPERISMO:} \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \text{Físico} \\ \text{Químico} \end{array} \right.$

Encontrados en la naturaleza en forma de áridos

ARTIFICIALES: TRITURACIÓN
(CHANCADOS)

Necesita de operaciones mecanizadas controladas para llegar a las condiciones de uso.

Desintegración : fragmentación por agentes físicos.

Expansiones y contracciones térmicas.

Ciclos hielo-deshielo.

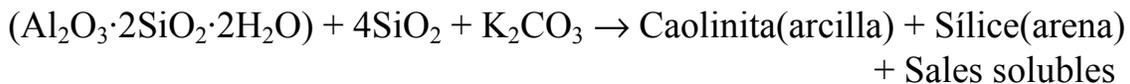
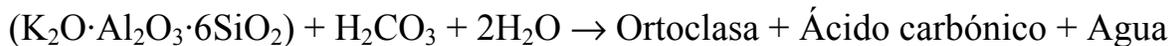
Erosión.

Descomposición : fragmentación por agentes químicos.

Oxidación

Hidratación.

Ácidos.



• POR TIPO DE YACIMIENTO

Bancos : Yacimiento formado encima del terreno.

Escombros de Falda – Terrazas fluviales y Cordilleranas

Minas o Pozos : Se forman en subterráneo

De Río : Formados en el lecho o en los márgenes de ríos y lagos.

De Mar : Formados en playa o fondo del mar.



- **POR FORMA Y TEXTURA**

- **POR ORIGEN GEOLÓGICO DE YACIMIENTOS**

Residuales :Depósitos encontrados en proximidad de la roca de origen.
Poseen buena granulometría.
Tienen grandes cantidades de impurezas.

Eólicos : Formados por acción del viento
Depósitos de material muy fino
Mala granulometría.
Gran pureza.

Aluviales : Formados por el transporte de las aguas

Marítimos :Mala granulometría.
Posible alta concentración de sales.

Fluviales : Los mejores áridos encontrados en la naturaleza.

Medios de transporte de áridos

Depósitos Aluviales.
Fluviales
Fluvioglaciales
Morrenas o glaciales
Depósitos Marinos.

- **POR CLASIFICACIÓN PETROGRÁFICA**



ESTRUCTURA DE LAS PARTÍCULAS DEL ÁRIDO

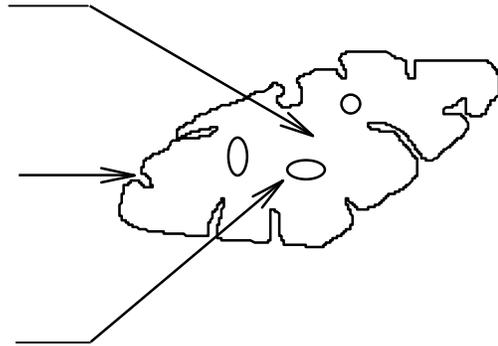
• PARTÍCULA

Material Sólido :

Poros : Espacios vacíos interiores de una partícula (grano) de un árido.

accesible : poro permeable o abierto al exterior (superficiales o conectados con ella).

inaccesible : poro impermeable o cerrado (se encuentra totalmente dentro del sólido).

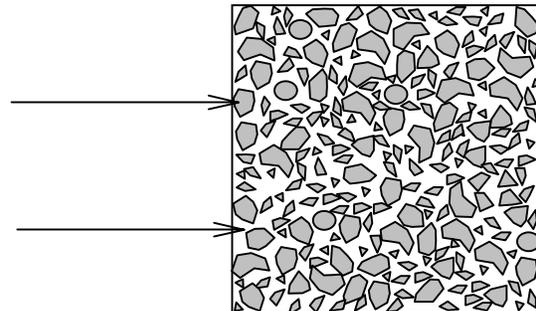


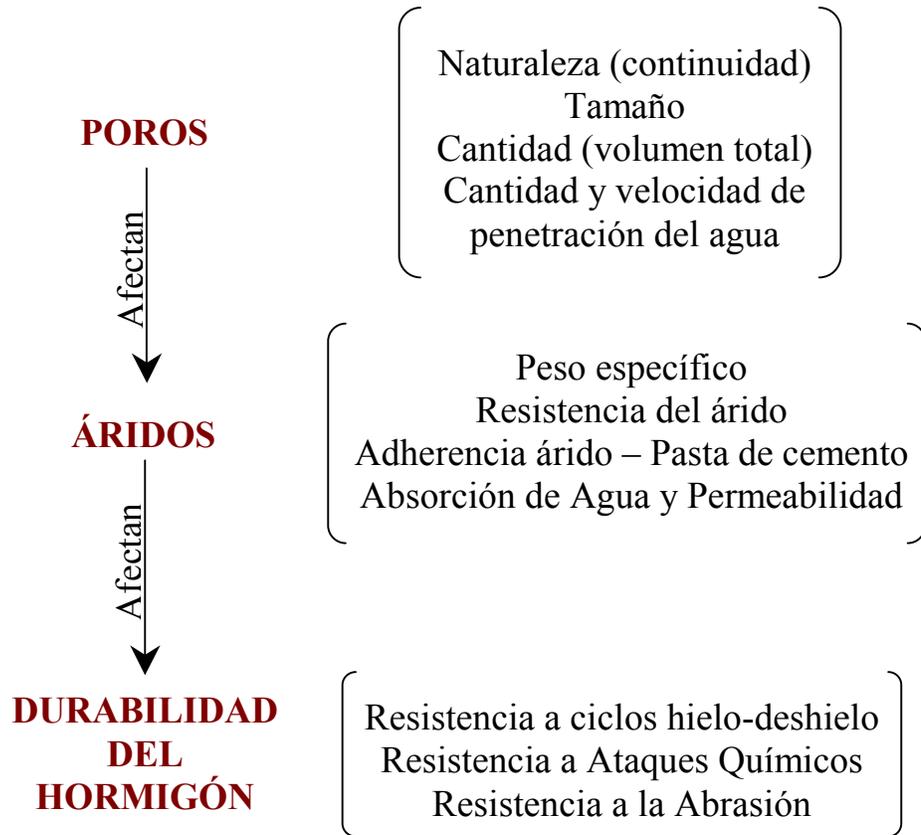
Poros áridos > Poros gel

• ÁRIDO

Partículas o granos :

Huecos : Espacios vacíos entre las partículas (granos) de un árido





Rango de porosidad de las Rocas comunes ≈ 0 a 50%

Porosidad del árido contribuye a la porosidad total del Hormigón.



• ESTADOS DE HUMEDAD DE LOS ÁRIDOS

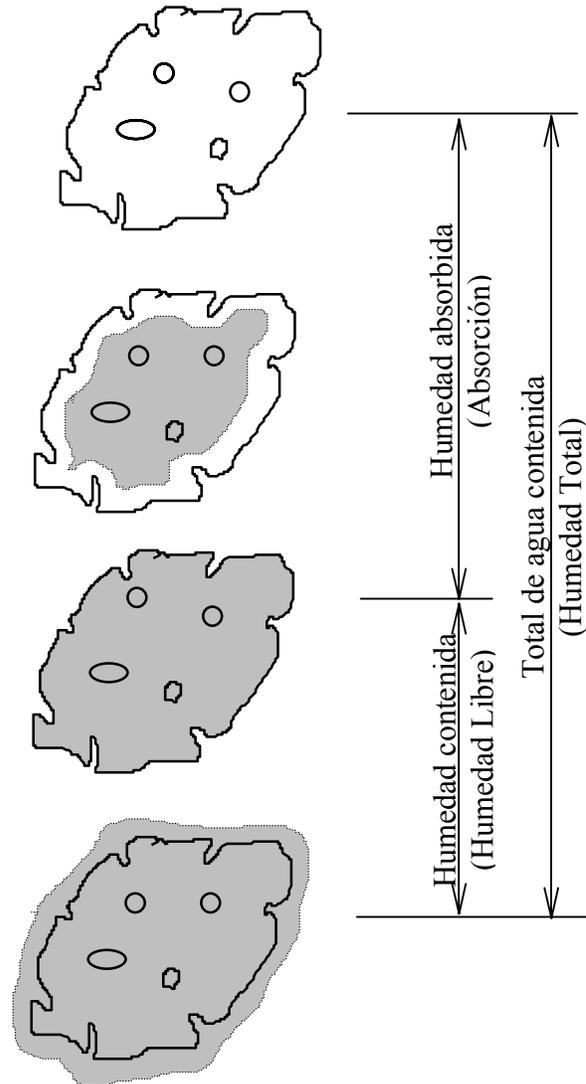
El árido húmedo contiene cantidad de agua en sus poros, aunque a veces se aprecien secos superficialmente. Se pueden distinguir cuatro estados de humedad:

Seco al horno : Se logra secando los áridos en un horno a 110°C hasta peso constante, de manera que se elimine totalmente el agua de sus poros (superficiales y conectados a la superficie).

Seco al aire : Mediante exposición al aire ambiente se produce un cierto secado y los poros se encuentran sólo parcialmente llenos de agua.

Saturado con superficie seca : Es un estado límite, en que el árido tiene todos sus poros llenos de agua pero está superficialmente seco. Este estado sólo se logra en laboratorio.

Húmedo o mojado : Todos los poros del árido están llenos de agua y además existe agua libre superficial.





CONSTANTES FÍSICAS DE LOS ÁRIDOS

Propiedades que por si mismas no son una medida de la calidad de un árido.
Sirven para caracterizar al árido.

- Densidad
- Contenido de Humedad
- Esponjamiento de las Arenas
- Compacidad y Huecos
- Superficie Específica.



• DENSIDAD V/S PESO ESPECÍFICO

$$\text{Densidad} = \frac{\text{masa (m)}}{\text{volumen (V)}} \quad [\text{Kg/dm}^3]$$

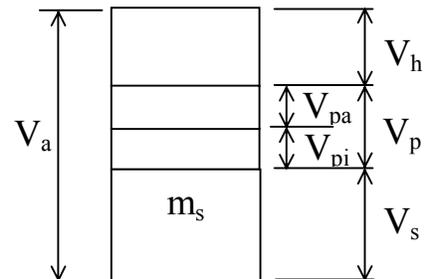
$$\text{Peso específico} = \frac{\text{Densidad Material } [\text{Kg/dm}^3]}{\text{Densidad Agua } [\text{Kg/dm}^3]} \quad [\text{Adimensional}]$$

Densidad absoluta : en condición seca

$$D_a = \frac{m_s}{V_s}$$

Densidad neta : en condición seca

$$D_n = \frac{m_s}{V_s + V_{pi}} = \frac{m_s}{V_{sa}}$$



Densidad real : en condición seca o sss.

$$G_r = \frac{m}{V_s + V_{pi} + V_{pa}} = \frac{m}{V_s + V_p} = \frac{m}{V_{sss}}$$

En condición seca : $G_{rs} = \frac{m_s}{V_{sss}}$

En condición sss : $G_{rsss} = \frac{m_s + m_{wp}}{V_{sss}}$

Densidad aparente : En forma compactada o suelta y en condición seca o húmeda.

$$g = \frac{m}{V_s + V_{pi} + V_{pa} + V_h} = \frac{m}{V_a}$$

$$g_{\text{suelta}}/g_{\text{compactada}} \approx 0,87 \text{ a } 0,96$$



Tabla 1. Valores típicos aproximados de densidades usadas

DENSIDAD	GRAVA	GRAVILLA	ARENA	APLICACIÓN
Aparente, seca compactada	1,65-1,70	1,55-1,65	1,70-1,80	Plantas en peso
Aparente, húmeda suelta	1,62-1,68	1,52-1,60	1,35-1,50	Plantas en volumen
Real, sss	2,67-2,70	2,67-2,72	2,65-2,70	Cálculo dosificación
Real, seca	2,65-2,70	2,65-2,70	2,60-2,65	Cálculo dosificación



• ABSORCIÓN

En una mezcla de hormigón, si los áridos no están completamente saturados, absorberán parte del agua de amasado hasta saturarse. A la inversa, si el árido contiene agua libre superficial, ella incrementará el agua de amasado. Por esto, en el cálculo de la razón W/C y en las dosificaciones, debe usarse como base la condición saturado superficie seca de los áridos (sss).

$$A = \frac{m_{sss} - m_s}{m_s} \cdot 100\%$$

A : Absorción (%)

m_s : Masa seco al horno

m_{sss} : Masa en condición sss

- La grava de canto rodado tiene mayor absorción que la grava triturada
- El agua realmente absorbida depende del orden de vaciado en la betonera y del recubrimiento de la grava con la pasta.
- El tiempo más real para determinar la cantidad de agua absorbida es entre 10 y 30 minutos.
- El árido seco al aire tiene menor cantidad real de agua absorbida.
- Los ensayos que rigen son: NCh 1239 (arena) y NCh 1117 (gravas)

• HUMEDAD

La humedad libre de un árido, valor sumament importante y necesario para hacer la corrección de dosificación por humedad que aportan los áridos, se determina como la diferencia porcentual entre la humedad total (obtenida por secado al horno 110°C) y la absorción, o sea :

$$H_t = \frac{m_h - m_s}{m_s} \cdot 100\% \quad H_l = H_t - A = \frac{m_h - m_{sss}}{m_s} \cdot 100\%$$

Con :

A : Absorción (%).

H_t : Humedad total (%).

H_l : Humedad libre (%).

m_h : masa de la muestra húmeda.

m_s : masa de la muestra seca al horno.

m_{sss} : masa de la muestra en estado sss.



La capacidad de los áridos para contener humedad libre depende de su tamaño : a menor tamaño mayor capacidad de retención de agua libre. Algunos valores aproximados son los siguientes :

Clase Árido	HI (%)
Grava y gravilla	0,5 - 2
Arena húmeda	1 - 4
Arena muy húmeda	6 - 12

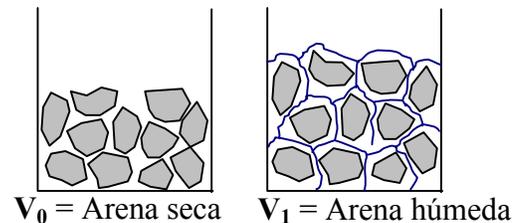
Recomendaciones:

- Como la humedad varía constantemente, se debe determinar frecuentemente la humedad y corregir la dosificación
- Para corregir : disminuir o aumentar W en cantidad igual a la masa del contenido de humedad



• ESPONJAMIENTO DE LAS ARENAS

La humedad libre en la arena produce el “esponjamiento”, que consiste en un aumento del volumen aparente de un volumen dado de arena, fenómeno que no se presenta en las gravas.

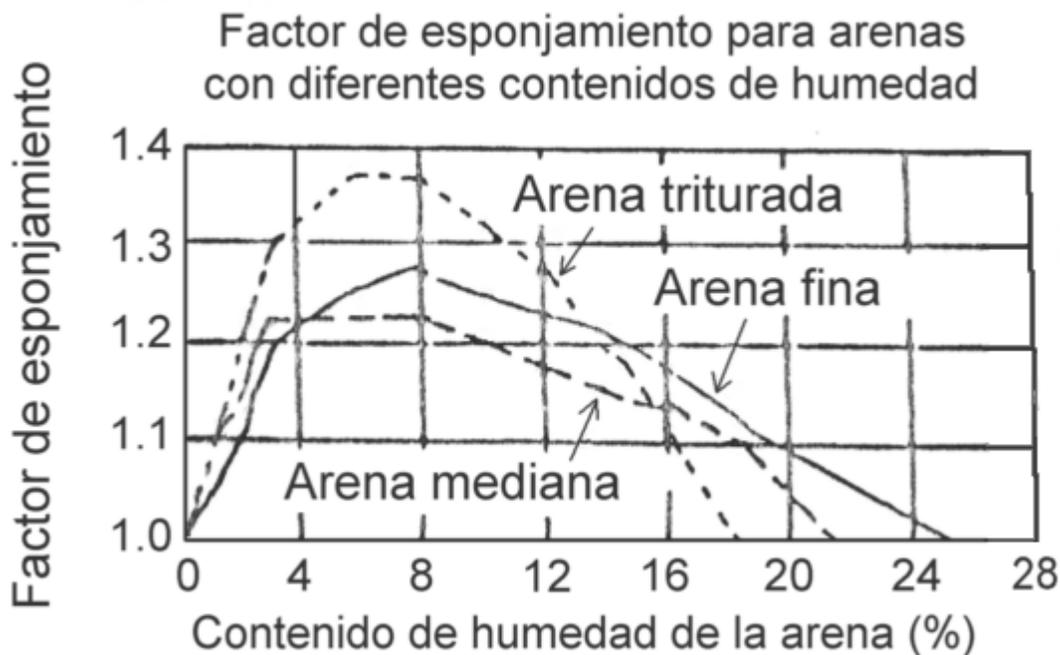


El esponjamiento tiene particular importancia cuando la medición de dosificación se hace en volumen. Sin no se le considera, da como resultado una medida errónea al incorporar una cantidad real de arena menor que la estipulada, lo cual origina hormigones faltos de finos, pedregosos y segregables.

$$E = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \cdot 100\%$$

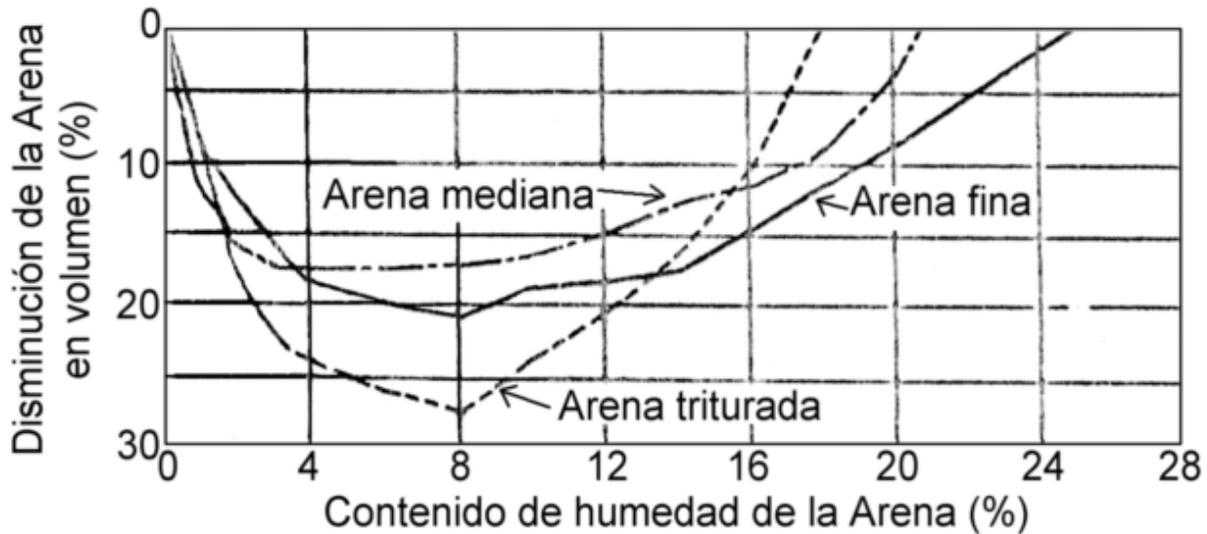
Factores :

- Humedad
- Finura de la Arena



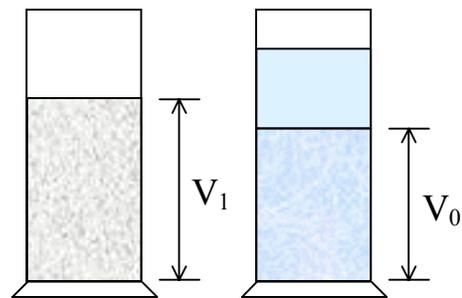
La solución está en compensar el esponjamiento agregando un mayor volumen de arena de acuerdo al valor de esponjamiento.

Valores típicos de las arenas de Santiago : $E \approx 20$ a 40%



Ensayo rápido para estimar el esponjamiento.

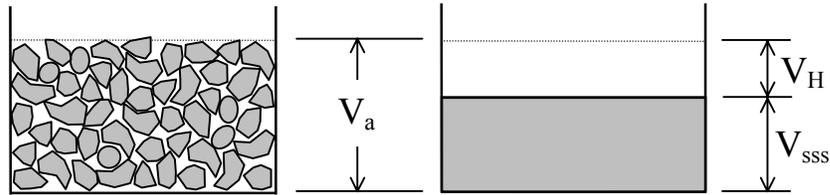
- Supuesto : el volumen que ocupa una arena inundada con agua es el mismo que ocupa la arena seca.
- En una probeta graduada de 1 ó 2 litros de capacidad se mide un volumen inicial de una muestra representativa de la arena húmeda emparejándola sin presionar; en seguida se vierte agua sobre la arena hasta inundarla, girando la probeta para eliminar las burbujas de aire. La arena se acomodará, disminuyendo su volumen. Se registra este volumen final. La diferencia de los volúmenes inicial y final se divide por el volumen de la arena inundada y se multiplica por 100 para tener el porcentaje de esponjamiento.



$$E = \frac{V_1 - V_0}{V_0} \cdot 100\%$$



• COMPACIDAD



Es la relación entre el volumen de sólidos que tiene un material granular y el volumen aparente que ocupa :

$$\beta = \frac{V_s + V_p}{V_a} = \frac{V_{SSS}}{V_a}$$

$$\left. \begin{array}{l} g = \frac{m}{V_a} \\ G = \frac{m}{V_{SSS}} \end{array} \right\} \Rightarrow \boxed{\frac{V_{SSS}}{V_a} = \frac{g}{G} = \beta}$$

• HUECOS

Es el volumen que ocupan los huecos.

Indica el volumen del mortero necesario para llenar el espacio entre partículas de árido.

$$V_a = V_H + V_{SSS} = 1$$



$$\boxed{V_H = 1 - V_{SSS} = 1 - \beta = 1 - \frac{g}{G}}$$

Se ensaya según la NCh 1326 of 77

Factores :

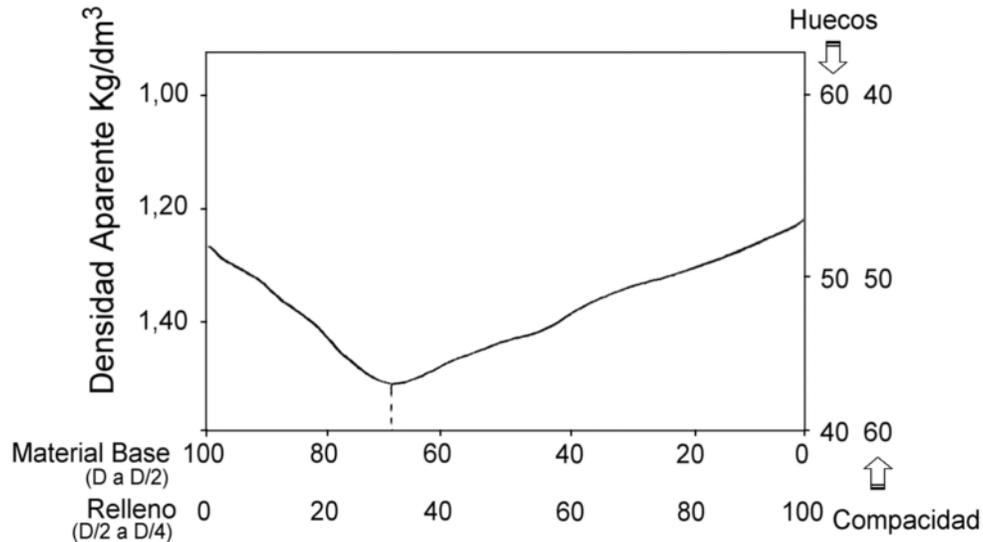
- La compactación depende de la granulometría
- Forma de los granos
- Grado de compactación v/s Porcentaje de huecos

Ley de Compactación : Se alcanza la máxima densidad de mezcla árido fino y grueso cuando la masa árido fino \approx 35 a 40% masa total del árido.

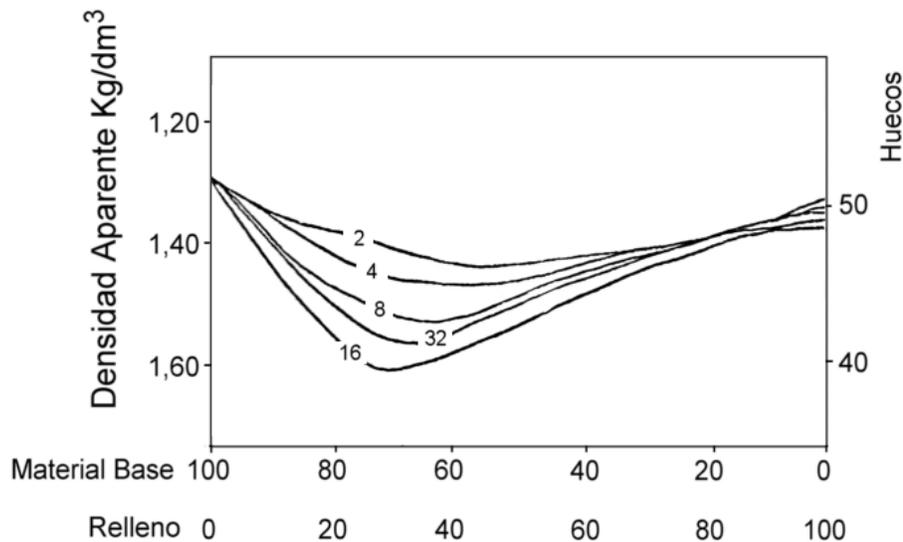


• LEYES DE LA COMPACIDAD

Cantidad Óptima de Relleno : Se alcanza la compacidad máxima de una mezcla binaria con 7 partes en peso de material monogranular base y 3 partes en peso de material monogranular de relleno.



Mejor Tamaño de Relleno : Para una base monogranular tamaño D, la máxima compacidad se alcanza con un material fino monogranular de tamaño D/16.



Granulometrías Continuas : Si se tiene una serie de combinaciones de áridos de compacidad máxima, si se mezclan se sigue obteniendo la Máxima compacidad.



• SUPERFICIE ESPECÍFICA

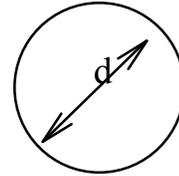
Corresponde a la suma del área total de las partículas que caben en la unidad de peso. Representa la superficie en que se reparte la pasta de cemento disponible o superficie necesaria de pintar.

Para esferas :

$$\text{Superficie : } S_{\text{esfera}} = \pi * d^2 \quad [\text{cm}^2]$$

$$\text{Volumen : } V_{\text{esfera}} = \pi * d^3 / 6 \quad [\text{cm}^3]$$

$$\text{Peso : } P_{\text{esfera}} = V G \quad [\text{g}]$$



Para N esferas :

$$S = N * \pi * d^2 \quad [\text{cm}^2]$$

$$V = N * \pi * d^3 / 6 \quad [\text{cm}^3]$$

$$P = V * G \quad [\text{g}]$$

$$N = \frac{6V}{\pi d^3}$$

$$V = \frac{P}{G}$$

$$N = \frac{6P}{\pi d^3 G}$$

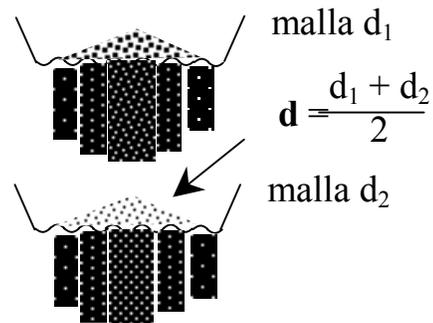
$$\boxed{\text{S.E.} = \frac{S}{P} = \frac{6}{d G}}$$

$$\begin{array}{l} \text{Si } d \text{ [cm]} \\ \xrightarrow{\hspace{2cm}} \\ \text{Si } G \text{ [kg/m}^3\text{]} \end{array}$$

$$\boxed{\text{S.E.} = \frac{6000}{d G} \quad [\text{cm}^2/\text{g}]}$$

Notas:

- A menor diámetro, mayor S.E.
- Para áridos, “d” es el diámetro medio de las aberturas de dos mallas sucesivas de la serie normal
- Corrección por forma de granos.
- Cálculo supone granos esféricos
- Para material de río, aumentar S.E. en 10 a 15%
- Para material chancado, aumentar S.E. en 40 a 60%



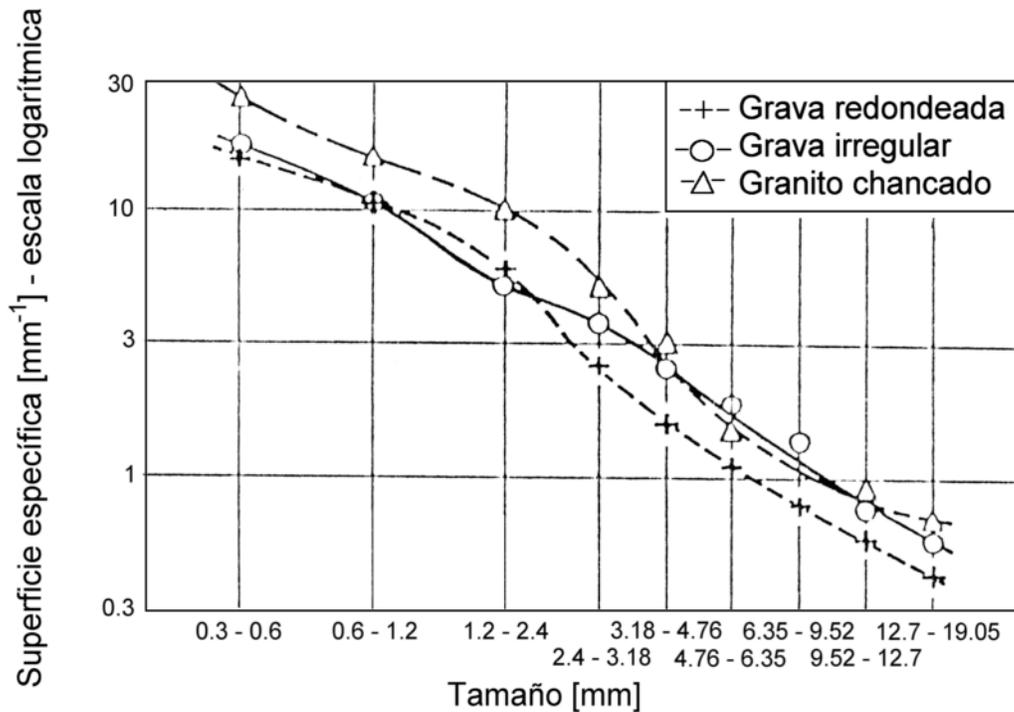


Figura 2. Efecto de Tamaño y Forma de las partículas en la Superficie Específica.

Fracción de tamaño de las partículas [mm]	Tamiz ASTM	Área superficial relativa	Índice de superficie de Murdock
76,20 – 38,10	3 – 1½ in	½	½
38,10 – 19,05	1½ - ¾ in	1	1
19,05 – 9,52	¾ - ⅝ in	2	2
9,52 – 4,76	⅝ - ⅜ in	4	4
4,76 – 2,40	⅜ in - 8	8	8
2,40 – 1,20	8 – 16	16	12
1,20 – 0,60	16 – 30	32	15
0,60 – 0,30	30 – 50	64	12
0,30 – 0,15	50 – 100	128	10
Menor a 0,15	Menor a 100		1

Tabla 2. Valores relativos del área superficial relativa y el índice de superficie



Superficie Específica del agregado	Resistencia del Hormigón a compresión a los 28 días		Densidad del Hormigón Fresco	
	[m ² /kg]	MPa	psi	kg/m ³
2,24	36,1	5240	2330	145,5
2,80	34,9	5060	2325	145,1
4,37	30,3	4390	2305	144,0
5,71	27,5	3990	2260	141,0

Tabla 3. Efecto sobre la Resistencia y Trabajabilidad



CONDICIONES QUE DEBEN CUMPLIR LOS ÁRIDOS

NCh 163 Of79 "Áridos Para Mortero y Hormigones"

❑ **Condición de Trabajabilidad**

Características necesarias para conferir al hormigón una trabajabilidad adecuada manteniendo su cohesión.

Alcanzar condiciones óptimas para mínima cantidad de huecos o máxima densidad sin segregación.

- ❑ Condición de Granulometría
- ❑ Condición de Tamaño máximo del árido
- ❑ Condición de Contenido de Granos Finos
- ❑ Condición de Forma y Textura de los Granos
- ❑ Condición de Porosidad de los Áridos

❑ **Condición de Resistencia Intrínseca del Árido**

Capacidad de resistir tensiones internas que le producen las solicitaciones aplicadas al elemento.

- ❑ Condición de Resistencia a :
 - ❑ Trituración
 - ❑ Indentación (dureza)
 - ❑ Impacto (tenacidad)
 - ❑ Desgaste (abrasión)
- ❑ Condición de Partículas blandas y desmenuzables

La calidad de los áridos tiene influencia secundaria en la calidad del hormigón :
Condiciones granulométricas, forma, textura y tamaño máximo.

❑ **Condición de Estabilidad**

Capacidad de resistir acciones físico-químicas generadas por condiciones ambientales e internas derivadas de su incorporación en el hormigón.

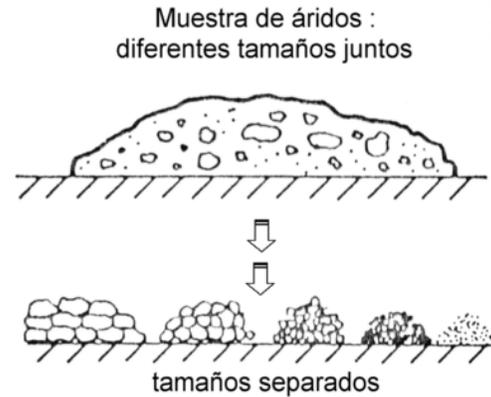
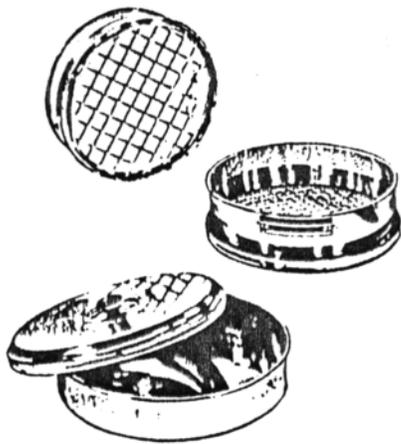
- ❑ Estabilidad Química
 - ❑ Condición de Reactividad Potencial
 - ❑ Condición de No Incorporar Productos Nocivos :
 - ❑ Impurezas Orgánicas
 - ❑ Sales : Cloruros, Sulfatos y Sulfuros
 - ❑ Carbón y Lignito
- ❑ Estabilidad Física
 - ❑ Condición de Resistencia a Variaciones Ambientales
 - ❑ Propiedades Térmicas.



• CONDICIÓN DE GRANULOMETRÍA

Granulometría : Distribución de porcentajes en peso de las partículas en función de su tamaño. Si se mezclan áridos de densidad muy diferentes esta distribución se puede hacer en volumen.

Análisis Granulométrico : Proceso de dividir una muestra de áridos en raciones del mismo tamaño de partículas.

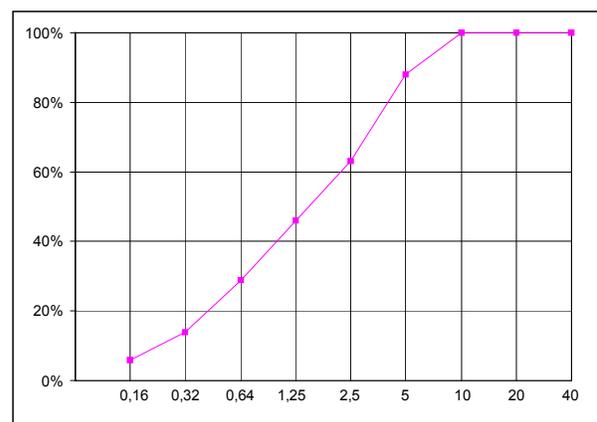


Ensayo según NCh 165Of77 – Tamizado : Medición de la masa de las fracciones del árido seco retenidas en mallas de dimensiones normalizadas, ordenadas de mayor a menor.

Se calculan los porcentajes en peso retenidos en cada malla respecto al total de la muestra aproximados al 1%.

Se representa en un gráfico como porcentaje acumulado que pasa cada tamiz versus tamaño nominal del tamiz en escala logarítmica.

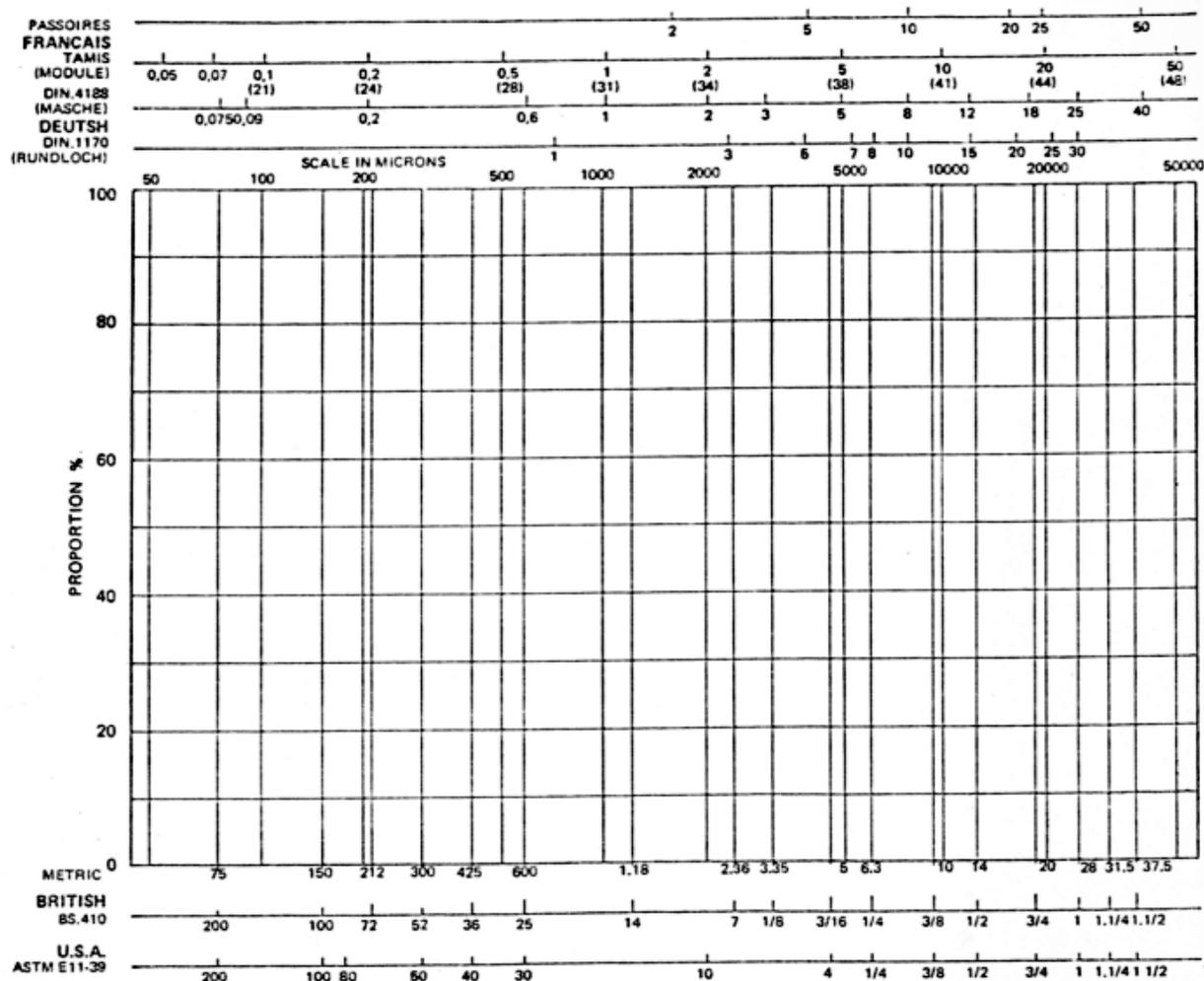
Tamices		% retenido parcial	% pasa acumulado
10		00	100
5		12	88
2.5		25	63
1.25		17	46
0.63		17	29
0.32		15	14
0.16		8	6
res		6	-





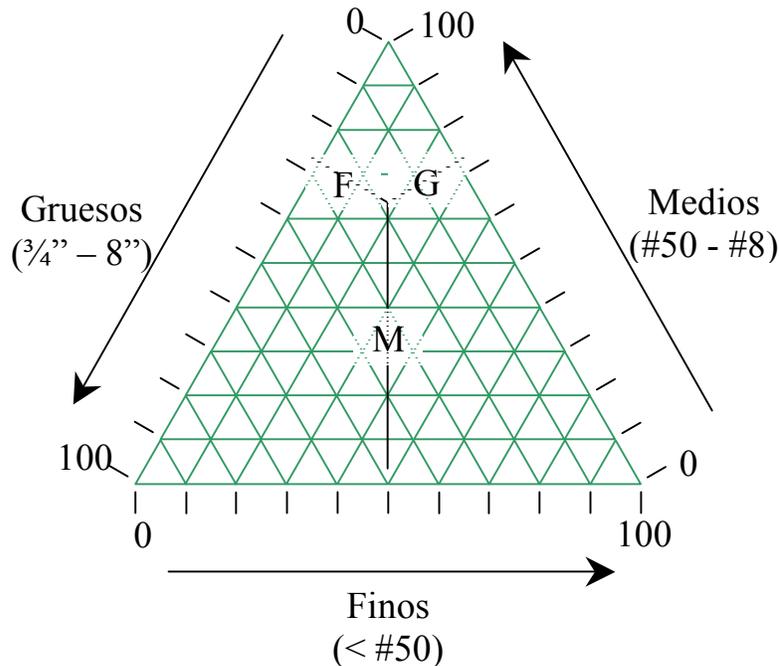
Correspondencia entre tamices NCh y ASTM.

Norma	Arena						Grava						
ASTM	# 100	# 50	# 30	# 16	# 8	# 4	3/8"	1/2"	3/4"	1"	1 1/2"	2"	2 1/2"
mm	0,15	0,30	0,60	1,18	2,36	4,75	9,5	12,5	19	25	38,1	50	63
NCh													
mm	0,16	0,315	0,63	1,25	2,5	5	10	12,5	20	25	40	50	63





Gráficos de Propiedades : Triángulo de Ferret



Propiedades de un Diagrama triangular :

- Distancia de un punto a los lados suman 100.
 - Toda relación lineal entre porcentajes define una recta.
 - Toda relación $P + \lambda Q = 0$ define un haz de rectas concurrentes al punto $(P = 0, Q = 0)$.
 - Toda relación $P + \lambda = 0$ define una familia de rectas paralelas
- P y Q son funciones lineales de los porcentajes y λ es un parámetro variable.

Tamaño máximo del agregado.

Tamaño máximo absoluto (D_a) : abertura del menor tamiz que deja pasar el 100% de la masa del árido.

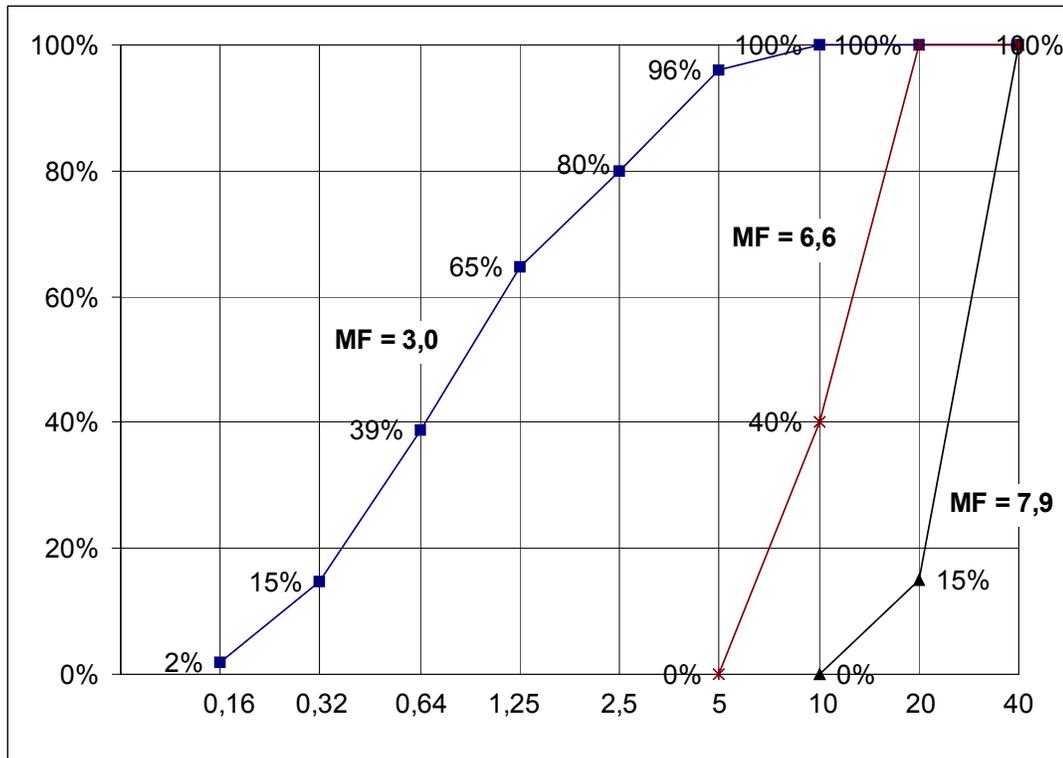
Tamaño máximo nominal (D_n) : abertura del tamiz inmediatamente menor a D_a , cuando por dicho tamiz pase el 90% o más de la masa del árido. Cuando pasa menos del 90%, el tamaño máximo nominal se considerará igual que el tamaño máximo absoluto.



Módulo de Finura.

Suma de los porcentajes retenidos acumulados (en serie de mallas establecidas) divididos por 100.

$$MF = \frac{\sum \% \text{ retenidos acumulados serie preferida (hasta malla } 0,16 \text{ mm)}}{100}$$



Representa el grosor del árido, cuanto mayor es el MF más grueso es el material.

Detecta pequeñas variaciones del árido de la misma fuente, las que afectarán la trabajabilidad del hormigón fresco.

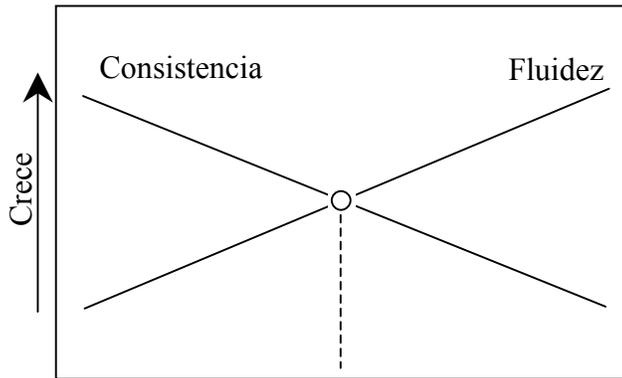
Tabla 4. Valores habituales de los áridos usados en la práctica :

Tipo de Árido	MF
Arido Fino (Arena)	2,5 – 3,5
Arido Medio (Gravilla)	6,5 – 7,0
Arido Grueso (Grava)	7,0 – 8,0



Influencia de la granulometría sobre la Trabajabilidad

No muy trabajable
Cohesiva
Mayor superficie específica y mayor cantidad de agua
Menor durabilidad



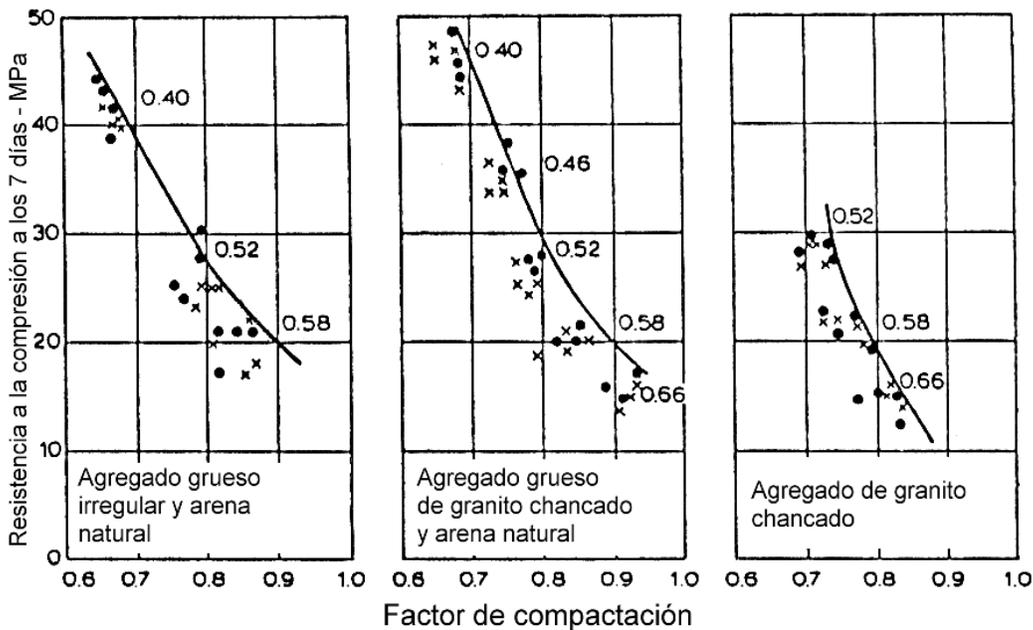
Relativamente trabajable
Peligro de segregación
Aspera
Difícil terminación

+ fino Punto óptimo + gruesa
AG/AF menor AG/AF ≈ 65% AG/AF mayor

$$\text{Razón} \frac{\text{Arido Grueso}}{\text{Arido Fino}} = \frac{\text{AG}}{\text{AF}}$$

Influencia de la granulometría sobre Resistencia.

La resistencia a la compresión depende del grado de compactación y la razón W/C. Es independiente de la granulometría.





Granulometría Óptima.

No existe granulometría ideal debido a efectos interactuantes de los factores que afectan la trabajabilidad.

Factores :

- **Superficie específica áridos** → Dosis de agua
Superficie específica ↔ Granulometría
Mayor diámetro → menor superficie específica → menor dosis de agua
Estimar agua en función de la superficie específica → Conduce a error por el efecto lubricante de las partículas de diámetro menor 0,15 mm.
- **Volumen relativo ocupado por el árido** → Compacidad
Condiciones económicas → Teoría de la máxima densidad
Granulometría para minimizar huecos → Hormigón fresco : áspero, pedregoso, no trabajable.
Trabajabilidad mejora si hay exceso de pasta sobre la necesaria para llenar los huecos de la arena y exceso de mortero sobre el requerido para llenar huecos dejados por la grava.
- **Tendencia a la segregación**
Trabajabilidad ← ¡Incompatibles! → Segregación

Prevenir la salida del mortero de los huecos de la grava.

- **Cantidad de finos** (partículas de diámetro menor a 0,32 mm, incluyendo al cemento)
Para asegurar la trabajabilidad de la mezcla.
Mezcla más rica en cemento → Menor contenido de arena



Tamaño máximo del agregado		Volumen absoluto de finos como fracción del volumen del hormigón (<0,125 mm)	Tamaño máximo nominal	Dosis de finos incluyendo al cemento (*)
mm	in		mm	kg/m ³
8	0,315	0,165	80	345
16	0,630	0,140	40	425
32	1,260	0,125	20	510
63	2,480	0,110	10	585

(*) no sobrepasar en 20% por efecto de las retracciones.

Métodos

- Bandas de referencia de normas
- Curvas de referencia de métodos de dosificación
- Estudios experimentales

Requisitos Granulométricos

Granulometría → Trabajabilidad → Compactación a Máxima densidad
→ Resistencia

Factores principales de la granulometría

- Superficie específica
- Volumen relativo ocupado por el árido
- Trabajabilidad
- Segregación
- ↓
- Granulometrías prácticas o bandas
- Combinación de áridos

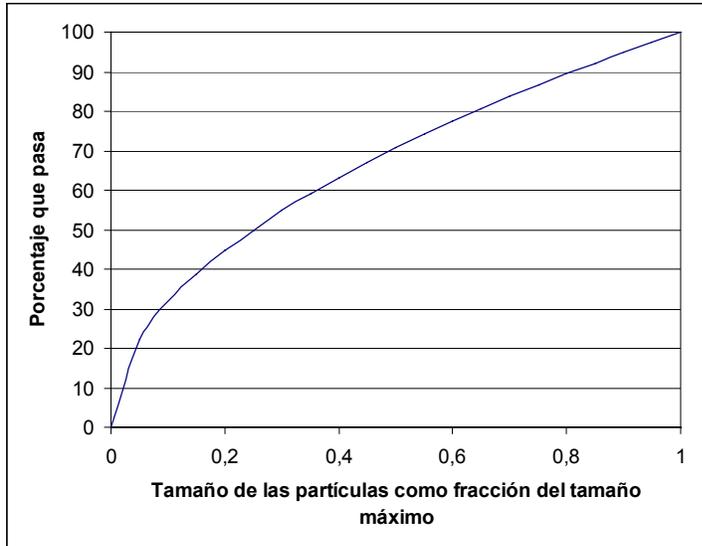
¿ Cómo combinar el árido fino con el árido grueso para obtener la granulometría deseada ?



Curva Granulométrica de Fuller

Al aumentar la cantidad de partículas sólidas que pueden empacarse en un volumen dado de hormigón, eleva la resistencia de éste. Esta teoría de la densidad máxima a llevado a utilizar curvas granulométricas ideales de forma parabólica.

La padre de las curvas ideales es el norteamericano Fuller, el cual enunció la siguiente relación para la curva de máxima densidad :



$$A = 100 \sqrt{\left(\frac{d}{D}\right)}$$

A : porcentaje que pasa por la malla de abertura d.

D : tamaño máximo del agregado.

El hormigón producido con agregados con una curva granulométrica de máxima , resulta áspero y poco trabajable.

Hormigones en masa con áridos $D_n > 40$ mm

ACI211.1-81 recomienda combinar fracciones gruesas para obtener la densidad máxima y minimizar los huecos.

Propone la curva :

$$P = \frac{d^x - 3,76^x}{D_n^x - 3,76^x} 100$$

P : porcentaje acumulado que pasa la malla de abertura d.

D_n : tamaño máximo nominal del árido.

x :



Requisitos granulométricos según NCh 163.

Todo árido usado debe encontrarse dentro de la banda correspondiente así como la combinación de éstos.

Tamiz mm	Tamaño máximo 40 mm			Tamaño máximo 20 mm		
	Arena	Grava	Árido Combinado	Arena	Grava	Árido Combinado
40	100%	90-100%	95-100%	100%	90-100%	100%
20	100%	35-70%	60-80%	100%	0-15%	100%
10	100%	10-30%	40-61%	100%	0-5%	62-77%
5	95-100%	0-5%	24-48%	95-100%		37-58%
2,5	80-100%		15-37%	80-100%		22-43%
1,25	50-85%		10-28%	50-85%		13-33%
0,63	25-60%		6-19%	25-60%		8-23%
0,32	10-30%		3-11%	10-30%		4-12%
0,16	2-10%		2-5%	2-10%		3-6%

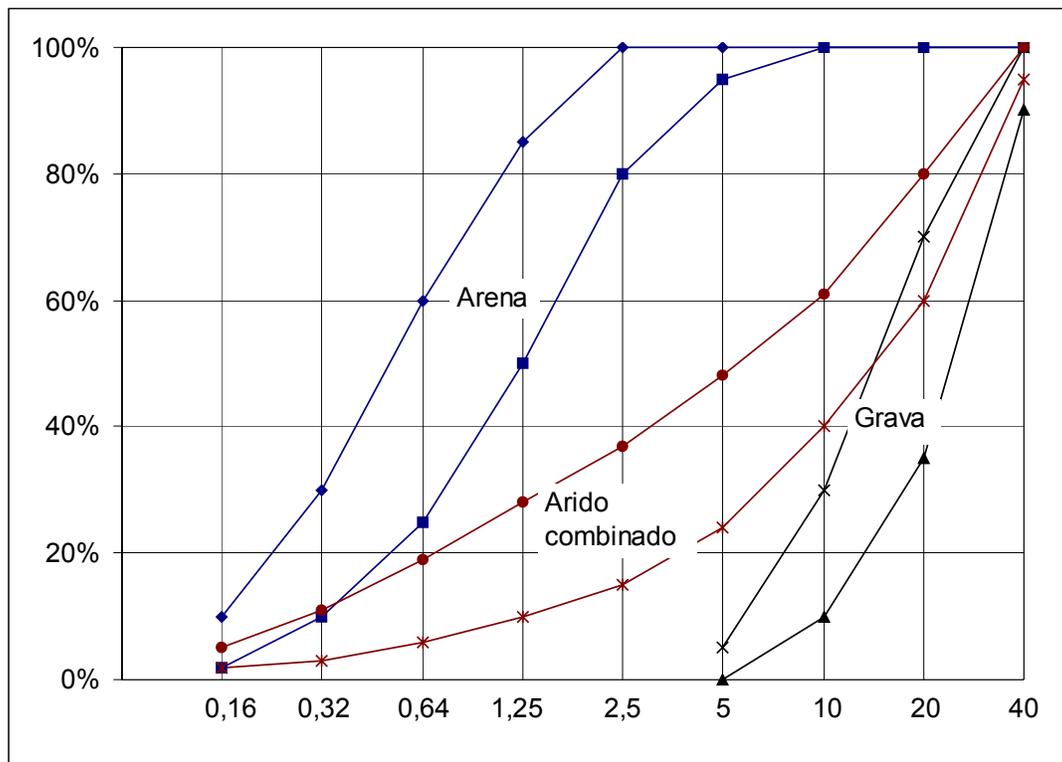


Figura 3. Bandas granulométricas para tamaño máximo de 40 mm



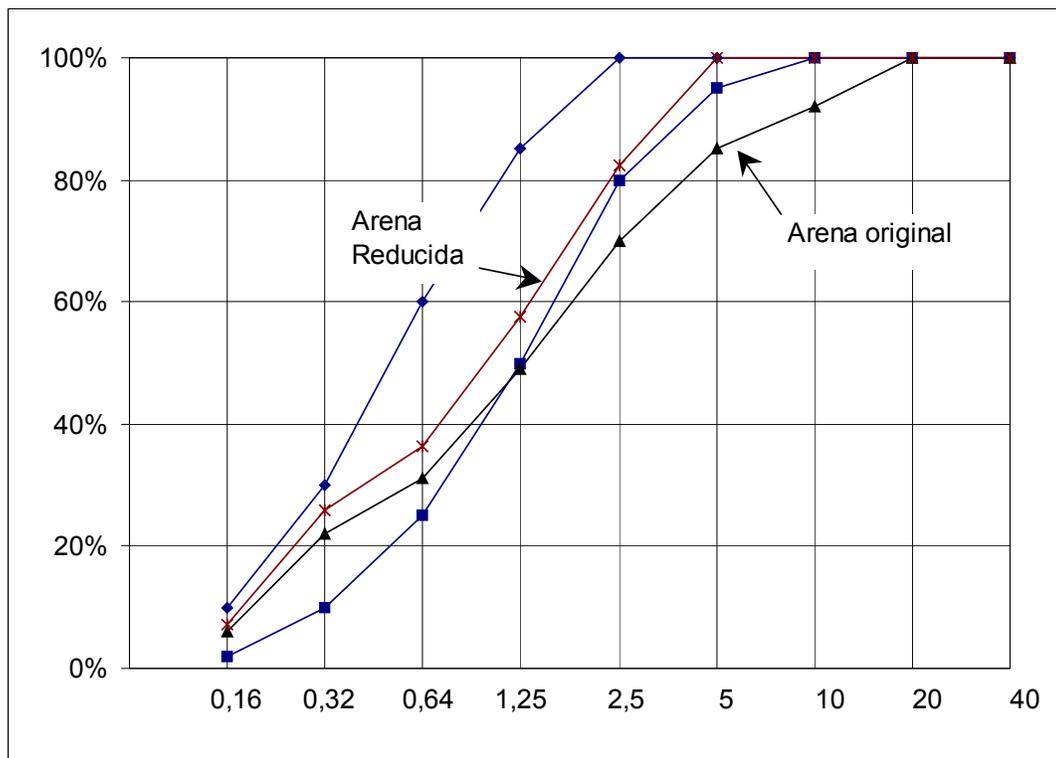
Ejemplo : Reducción de una arena.

Tenemos los resultados de un ensayo de granulometría de una arena.

Tamiz	Arena	Arena Reducida
40	100%	
20	100%	
10	92%	
5	85%	100%
2,5	70%	82%
1,25	49%	58%
0,63	31%	36%
0,32	22%	26%
0,16	6%	7%

El primer requisito de una arena consiste en verificar si D_n es 5 mm. Como observamos de la tabla el 15% del material tiene un diámetro mayor a 5 mm por lo que no cumple esta condición. Podemos apreciar que la curva de la arena se sale de la banda admisible para las arenas.

Para corregir esta arena se procede a reducirla a un tamaño de 5 mm, esto consiste en eliminar el material de diámetro mayor a 5 mm, lo cual numéricamente consiste en dividir los porcentajes de los tamices menores a 5 mm por el porcentaje acumulado que pasa en tamiz 5 mm (85%).



La arena reducida cumple los requisitos de la norma NCh163.



Banda granulométricas recomendadas por NCh163Of79.

Además de exigir requisitos a los áridos, la norma recomienda que la curva del árido combinado este dentro de ciertas bandas dependiendo del hormigón que se desea obtener.

Tamiz mm	Tamaño máximo 10mm				Tamaño máximo 20mm			
	D	A	B	C	D	A	B	C
40	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	30	62	77	88
5	30	61	74	87	30	37	58	75
2,5	30	37	56	73	30	22	43	63
1,25	30	22	41	59		13	33	52
0,63		13	27	43		8	23	38
0,32		5	13	26		4	12	23
0,16		3	7	10		3	6	9

Tamiz Mm	Tamaño máximo 40mm				Tamaño máximo 80mm			
	D	A	B	C	D	A	B	C
80	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	30	70	80	90
20	30	60	80	90	30	45	65	80
10	30	40	61	80	30	30	50	70
5	30	24	48	66	30	20	40	60
2,5		15	37	55		12	30	50
1,25		10	28	42		7	25	40
0,63		6	19	30		4	17	28
0,32		3	11	19		3	9	17
0,16		2	5	8		2	4	7



Figura 4. Curva Granulométrica recomendada para un tamaño máximo de 20 mm

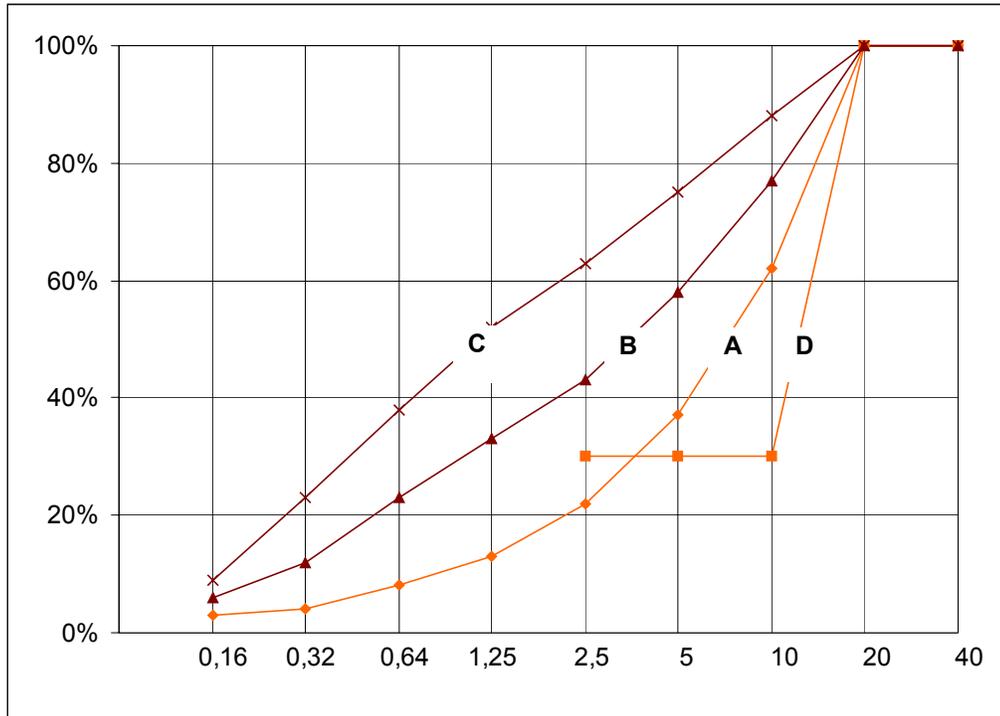
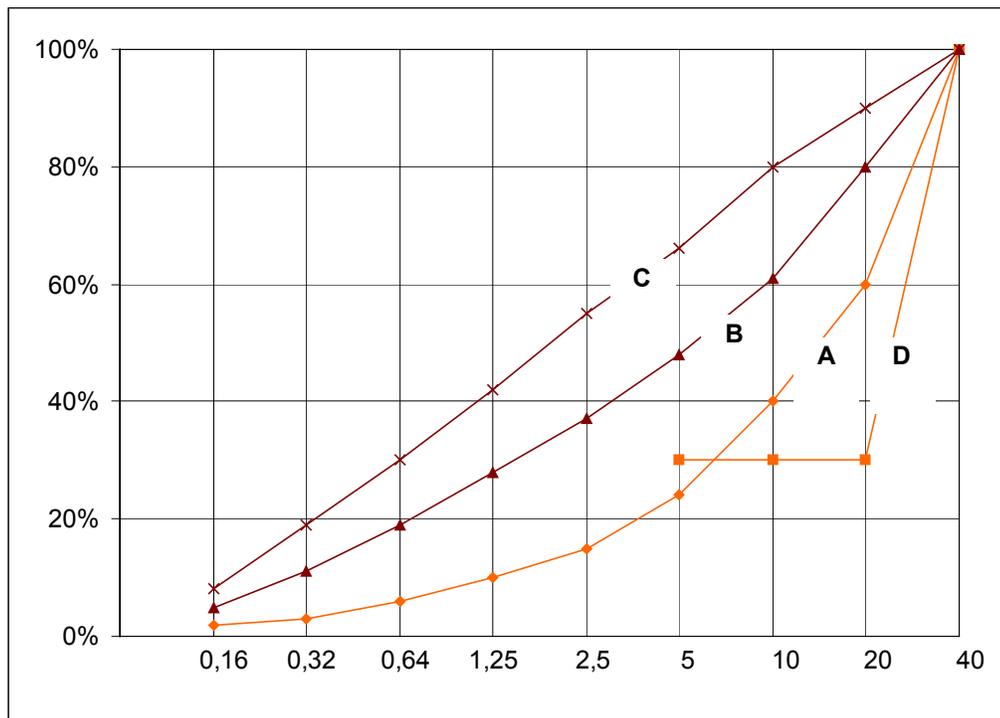


Figura 5. Curva Granulométrica recomendada para un tamaño máximo de 40 mm





Significado de las bandas.

Zona 1 : curvas límites C y D

Zona aceptable para granulometrías discontinuas.

Zona 2 : curvas límites A y B

Zona preferida.

Zona 3 : curvas límites B y C

Aceptable, pero requiere más cemento y agua.

La curva del árido combinado debe tener en lo posible una forma similar (paralela) a las curvas límites y no debe cruzar de una zona a otra.

Curva A :

Granulometría más gruesa.

Relativamente trabajable.

Usar en mezclas con baja razón W/C o mezclas ricas.

Verificar que no exista segregación.

Curva C :

Granulometría Fina.

Cohesiva.

No muy trabajable.

Curva D :

Granulometría discontinua.

Peligro segregación.

Si hay exceso de tamaños intermedios será áspera y difícil de compactar.



Curvas granulométricas recomendadas por la norma británica (Road Note N°4)

Tami z mm	Tamaño máximo 40 mm				Tamaño máximo 20 mm				Tamaño máximo 10 mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
40	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
20	50%	59%	67%	75%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
10	36%	44%	52%	60%	45%	56%	65%	75%	100%	100%	100%	100%
5	24%	32%	40%	47%	30%	35%	42%	48%	30%	45%	60%	75%
2,5	18%	25%	31%	38%	23%	26%	36%	42%	20%	33%	45%	60%
1,25	12%	17%	24%	30%	16%	21%	28%	34%	16%	26%	37%	46%
0,63	7%	12%	17%	23%	9%	14%	21%	27%	12%	19%	28%	34%
0,32	3%	7%	11%	15%	2%	3%	5%	12%	4%	8%	14%	20%
0,16	0%	0%	2%	5%	0%	0%	0%	2%	0%	1%	2%	6%

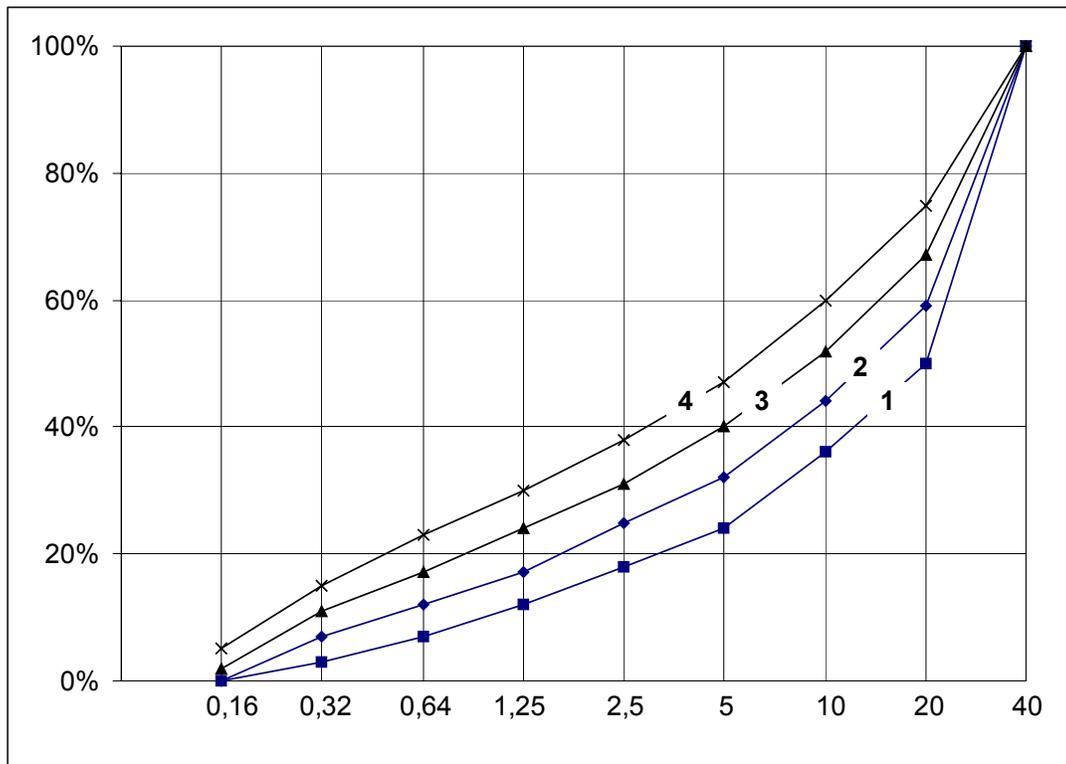


Figura 6. Curva Granulométrica recomendada para un tamaño máximo de 40 mm

Curva 1 : Pavimentos

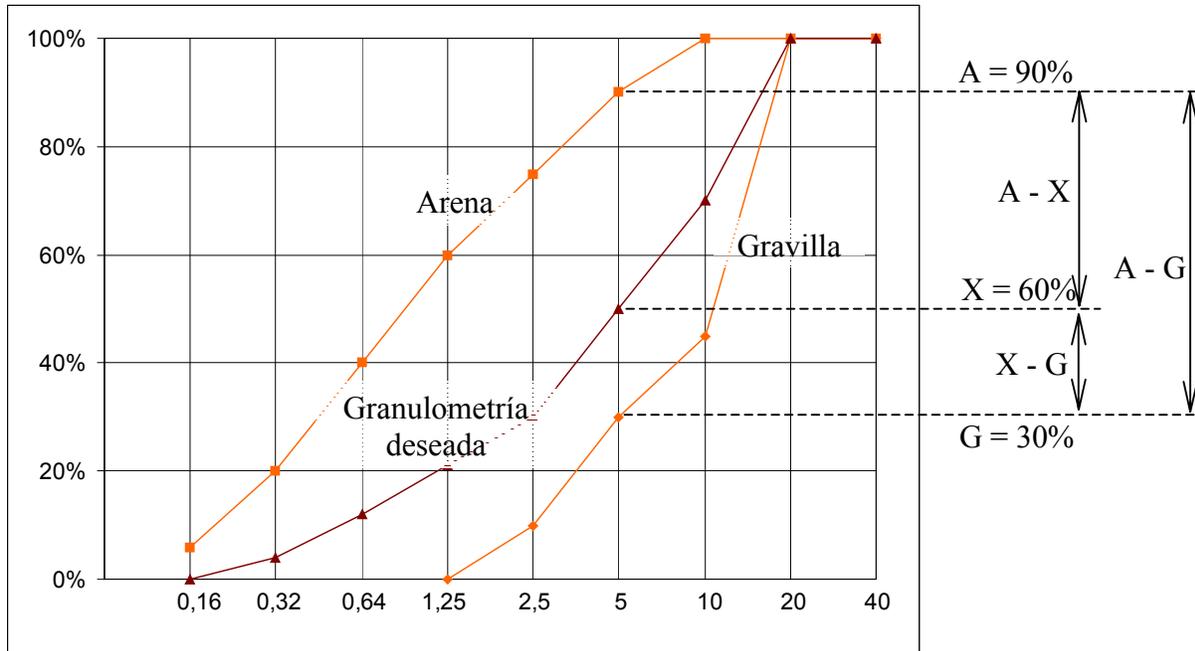
Curva 2 : Fuller

Curva 3 : Hormigón Bombeable



➤ Métodos de proporcionamiento de los áridos

Rutina de Ajuste para dos áridos.



Determinación del porcentaje de arena referido al total de áridos para que la curva granulométrica coincida con la curva deseada.

Para cada tamiz se aplica el siguiente sistema de ecuaciones :

$$X = \alpha \times A + \beta \times G$$

$$\alpha + \beta = 1$$

$$\alpha = \frac{X - G}{A - G} \times 100 \%$$

$$\beta = \frac{A - X}{A - G} \times 100 \%$$

donde :

X = porcentaje de árido combinado de la granulometría deseada para una malla dada.

A = porcentaje de arena para una malla dada.

G = porcentaje de grava para una malla dada.

α = porcentaje de arena buscado.

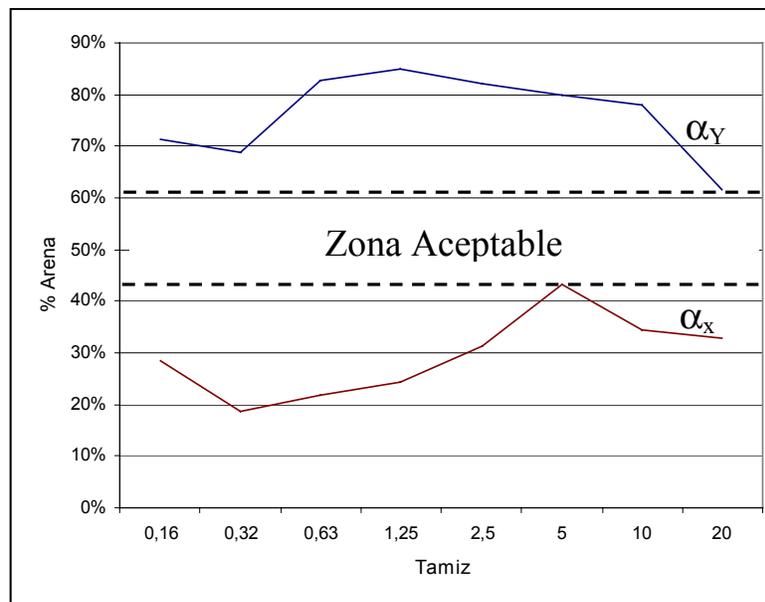
β = porcentaje de grava buscado.



Estas ecuaciones no se pueden aplicar cuando $(A - G)$ es negativo, es decir, la curva de la arena esta bajo la de la grava, lo que significa que los áridos están mezclados. Tampoco se pueden aplicar cuando $(X - G)$ ó $(A - G)$ son negativos, es decir, cuando la curva deseada este sobre (o debajo) de las curvas de la arena y la grava a la vez, es este caso hay que utilizar un tercer árido o reducir los existentes.

Aplicando las ecuaciones en las curvas X e Y, envolventes de la banda deseada, en cada malla se obtiene :

Tamiz	Arena	Grava	X	Y	α_X	α_Y
40	100%	100%	100%	100%		
20	100%	48%	65%	80%	33%	62%
10	82%	18%	40%	68%	34%	78%
5	60%	0%	26%	48%	43%	80%
2,5	45%		14%	37%	31%	82%
1,25	33%		8%	28%	24%	85%
0,63	23%		5%	19%	22%	83%
0,32	16%		3%	11%	19%	69%
0,16	7%		2%	5%	29%	71%



La zona aceptable tiene como límites $\alpha_x = 43\%$ y $\alpha_y = 62\%$. Cualquier valor entre éstos garantiza que la curva del árido combinado esta completamente dentro de la banda cuyos límites son X e Y.



Eligiendo un valor intermedio, por ejemplo $\alpha = 55\%$, se obtiene :

Tamiz	Arena	α	Grava $\beta = 1 - \alpha$	Árido
40	100%		100%	100%
20	100%		48%	77%
10	82%		18%	53%
5	60%		0%	33%
2,5	45%	$\times 55\% +$	$\times 45\% =$	25%
1,25	33%			18%
0,63	23%			13%
0,32	16%			9%
0,16	7%			4%

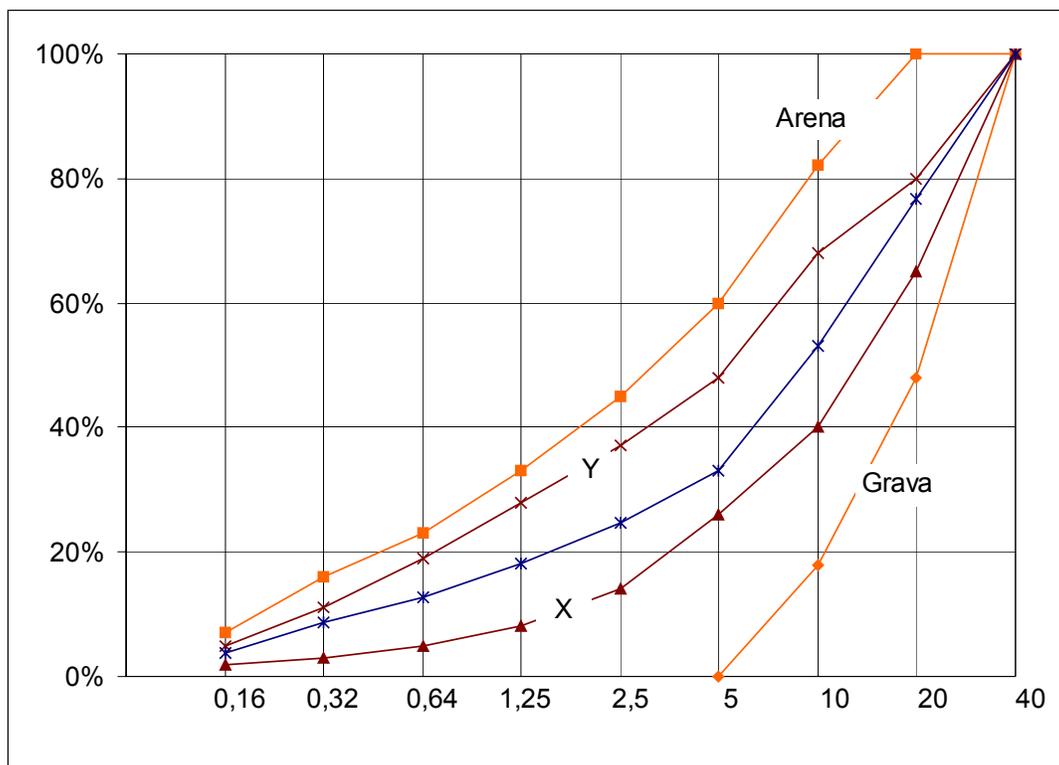
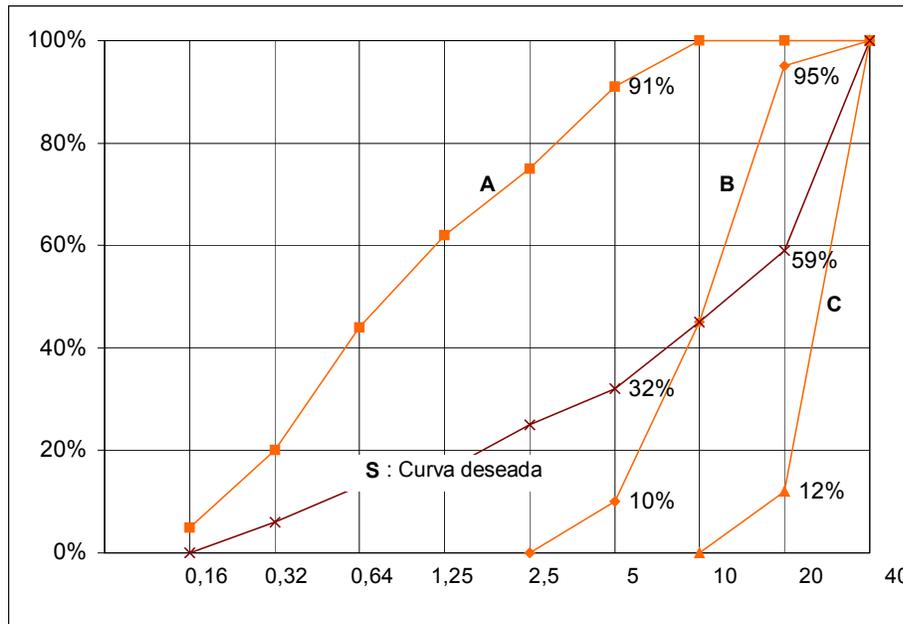
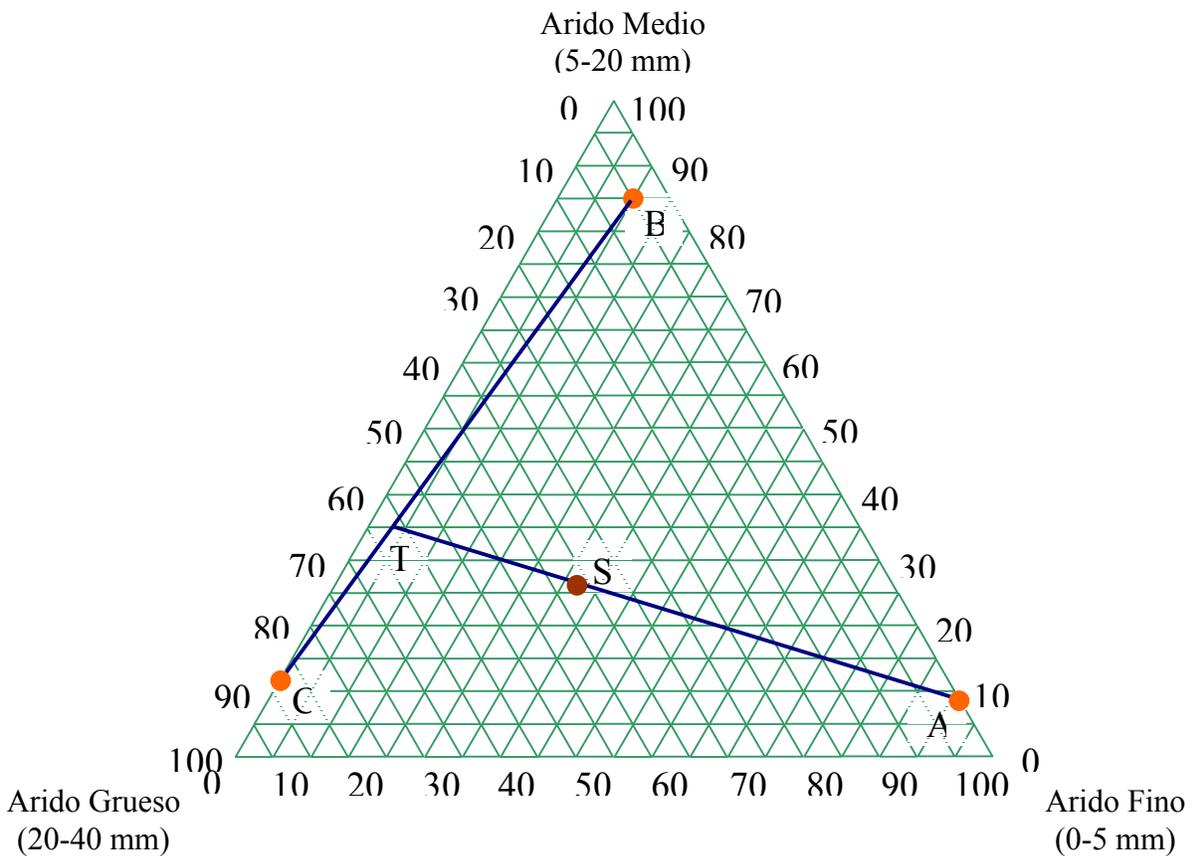


Figura 7. Curva Granulométrica del árido combinado con 55% de arena y 45% de grava.

Rutina de Ajuste para tres áridos.



Graficando estas cuatro curvas en un triángulo de Feret.





Los porcentajes de cada árido se obtienen geoméricamente de los trazos resultantes al unir dos de los áridos con una recta e intersectarla con la recta que pasa por el tercero y por la curva deseada (S).

$$\frac{A}{A+B+C} = \frac{TS}{TA}$$

$$\frac{B}{B+C} = \frac{CT}{TB}$$

$$\frac{B+C}{A+B+C} = \frac{CB}{TA}$$

$$\frac{B+C}{A+B+C} = \frac{CB}{SA}$$

$$\frac{A}{A+B+C} = \frac{TS}{TA}$$

$$\% \text{Arena(A)} = \frac{TS}{TA} \times 100$$

$$\% \text{Gravilla(B)} = \frac{CT \times SA}{CB \times TA} \times 100$$

$$\% \text{Grava(C)} = \frac{TB \times SA}{CB \times TA} \times 100$$

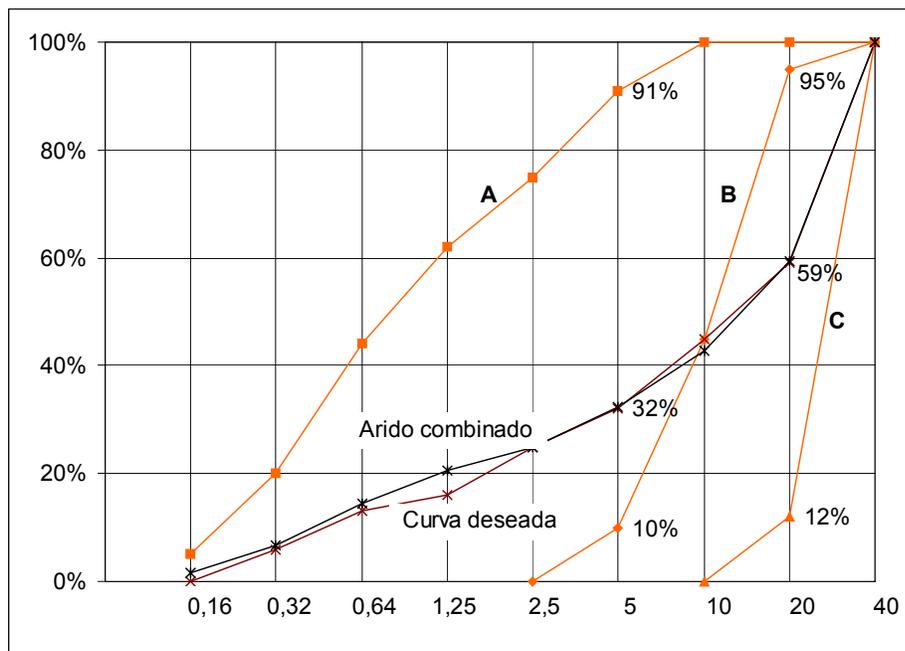
Con los valores obtenidos del ejemplo :

$$\%A = 3,2 / 9,8 = 33\%$$

$$\%B = 3,2 \times 6,6 / (9,9 \times 9,8) = 22\%$$

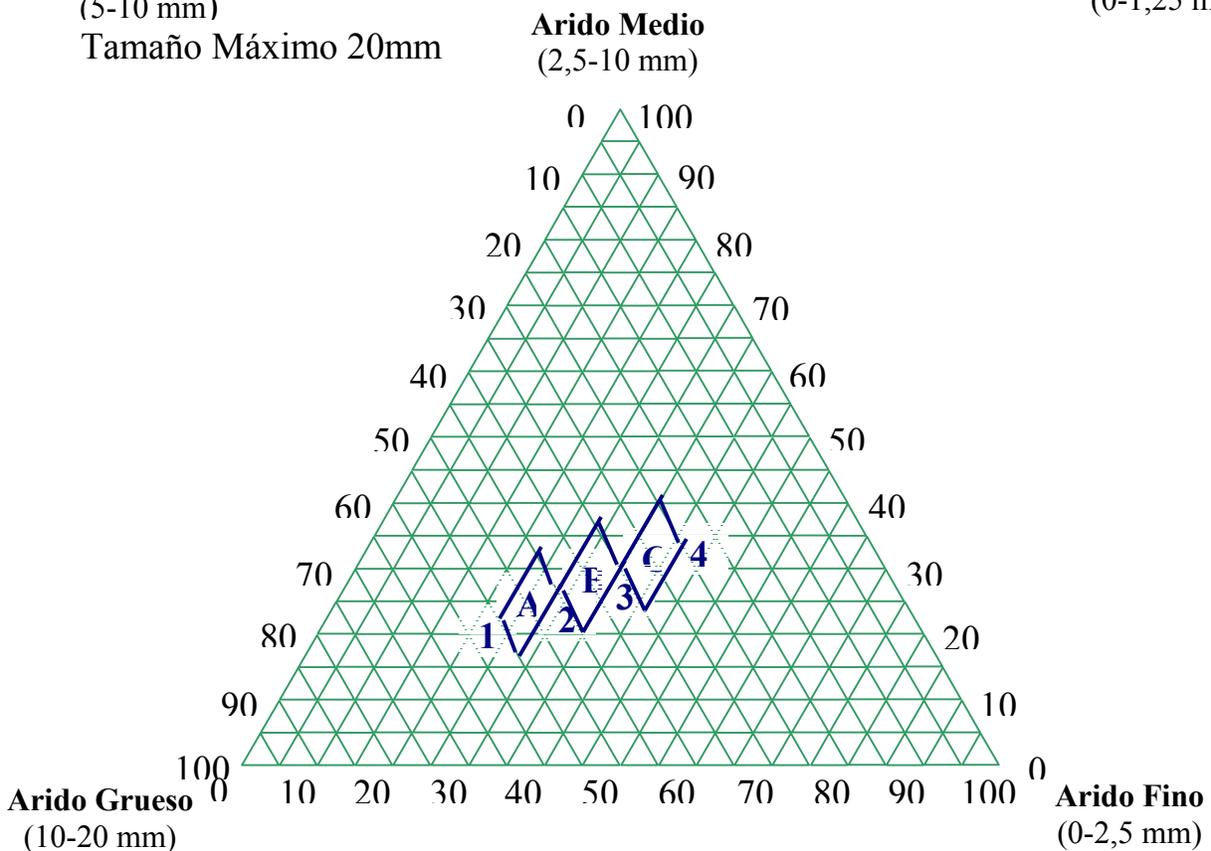
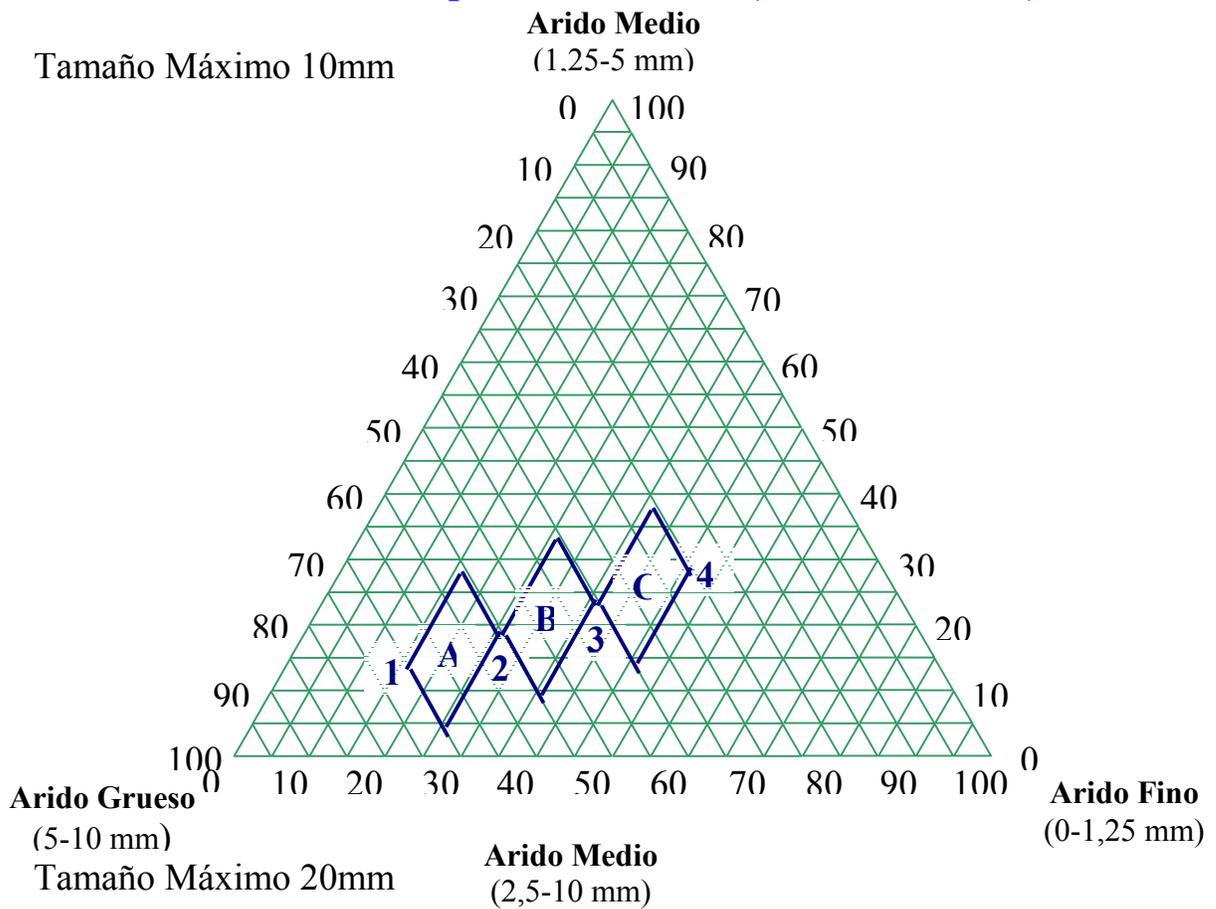
$$\%C = 6,7 \times 6,6 / (9,9 \times 9,8) = 45\%$$

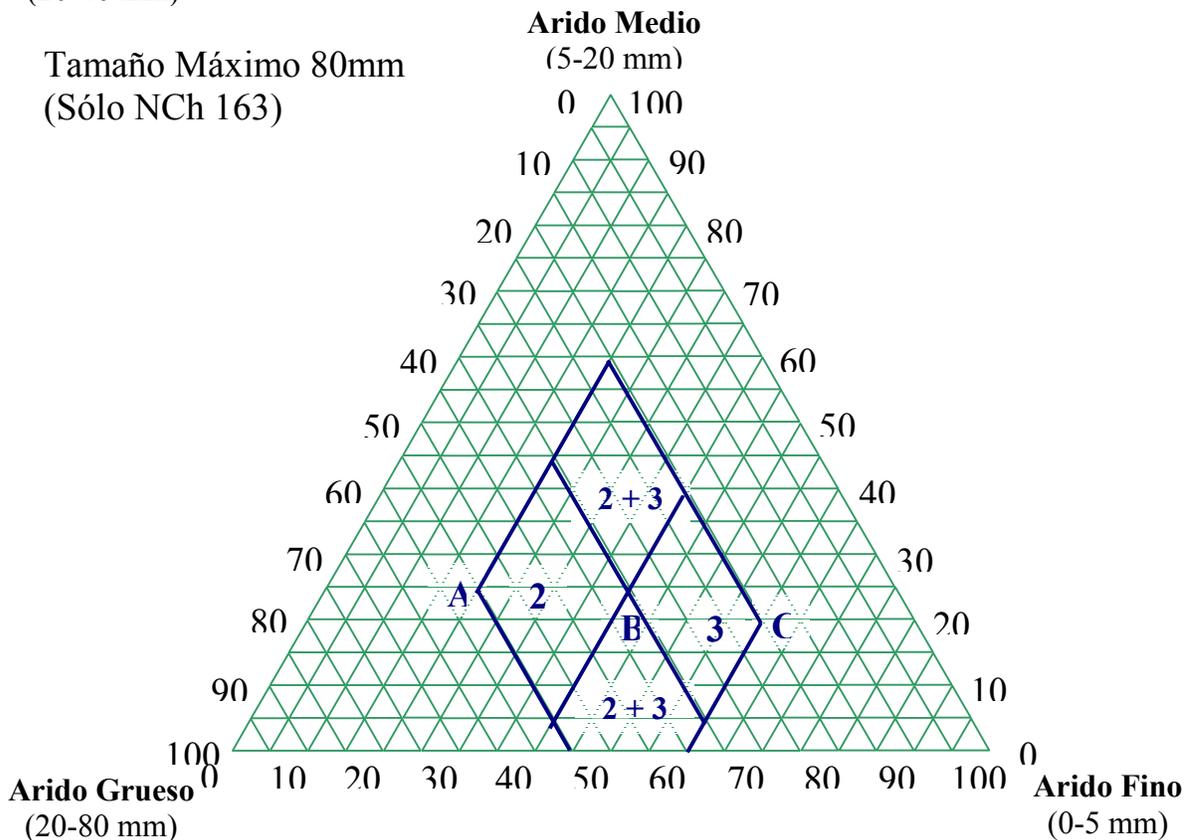
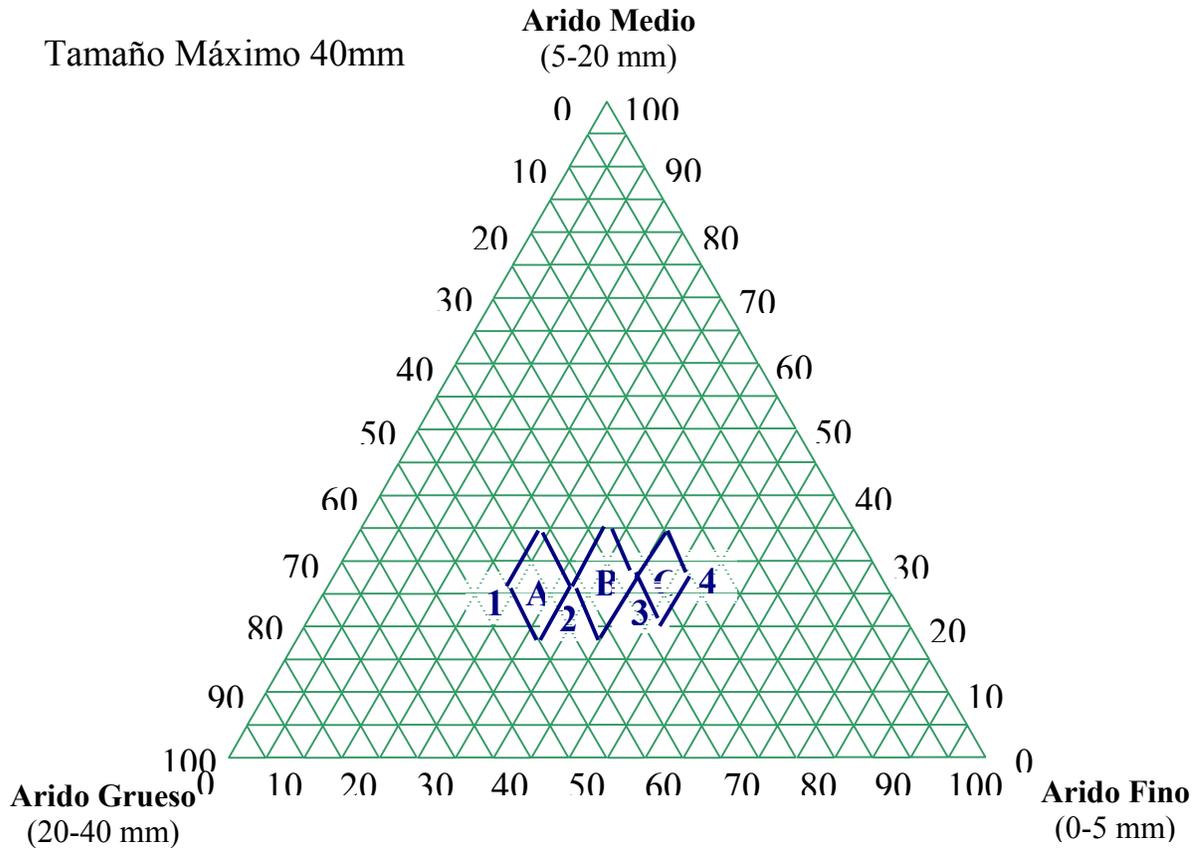
Con lo que se obtiene :





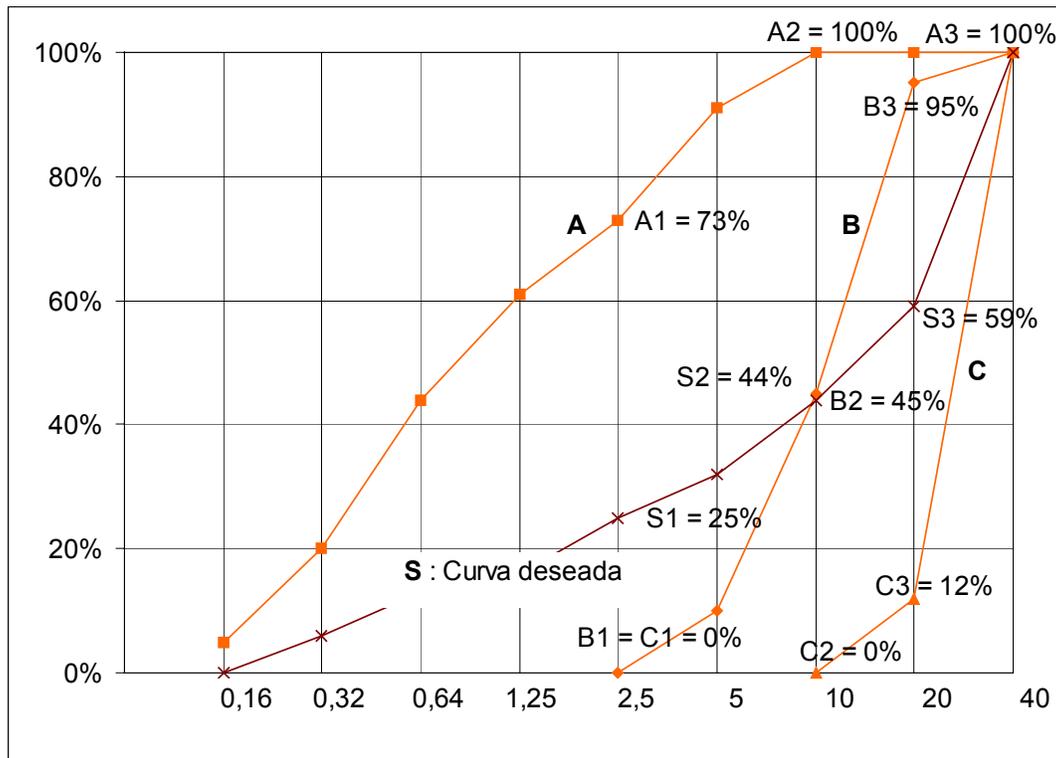
Curvas recomendadas para tres áridos (Road Note N°4)







Planteando un Sistema de Ecuaciones.



Planteando un sistema de ecuaciones en los puntos donde las curvas B y C tienen 0%.

$$\begin{aligned}\alpha \times A_1 + \beta \times B_1 + \gamma \times C_1 &= S_1 \\ \alpha \times A_2 + \beta \times B_2 + \gamma \times C_2 &= S_2 \\ \alpha \times A_3 + \beta \times B_3 + \gamma \times C_3 &= S_3\end{aligned}$$

del cual se obtienen valores para α , β y γ pero que no suman 100%, luego se obtienen valores proporcionales.

$$\%Material \ A : \alpha_m = \frac{\alpha}{\alpha + \beta + \gamma} \times 100$$

$$\%Material \ B : \beta_m = \frac{\beta}{\alpha + \beta + \gamma} \times 100$$

$$\%Material \ C : \gamma_m = \frac{\gamma}{\alpha + \beta + \gamma} \times 100$$

y en este caso se cumple que $\alpha_m + \beta_m + \gamma_m = 100\%$



Utilizando los valores del ejemplo :

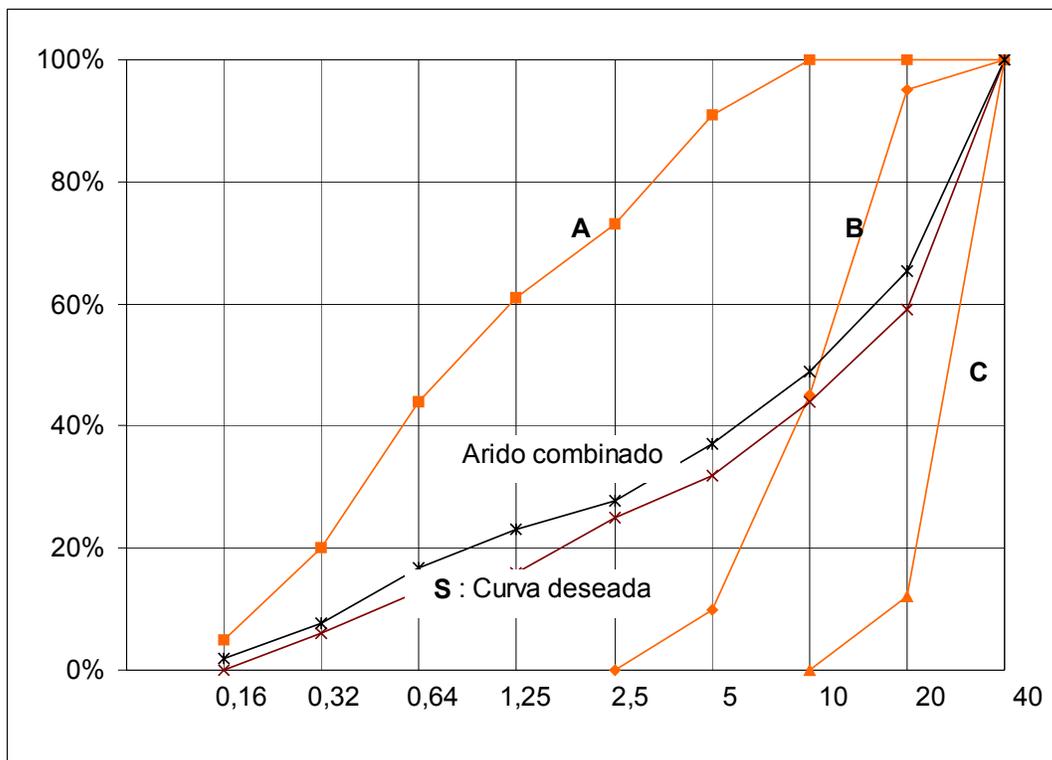
$$\begin{aligned}\alpha \times 73 + \beta \times 0 + \gamma \times 0 &= 25 \\ \alpha \times 100 + \beta \times 45 + \gamma \times 0 &= 44 \\ \alpha \times 100 + \beta \times 95 + \gamma \times 12 &= 59\end{aligned}$$

Se obtiene :

$$\alpha = 0,342, \beta = 0,217, \gamma = 0,345$$

Aplicando las ecuaciones :

$$\alpha_m = 38\%, \beta_m = 24\%, \gamma_m = 38\%$$



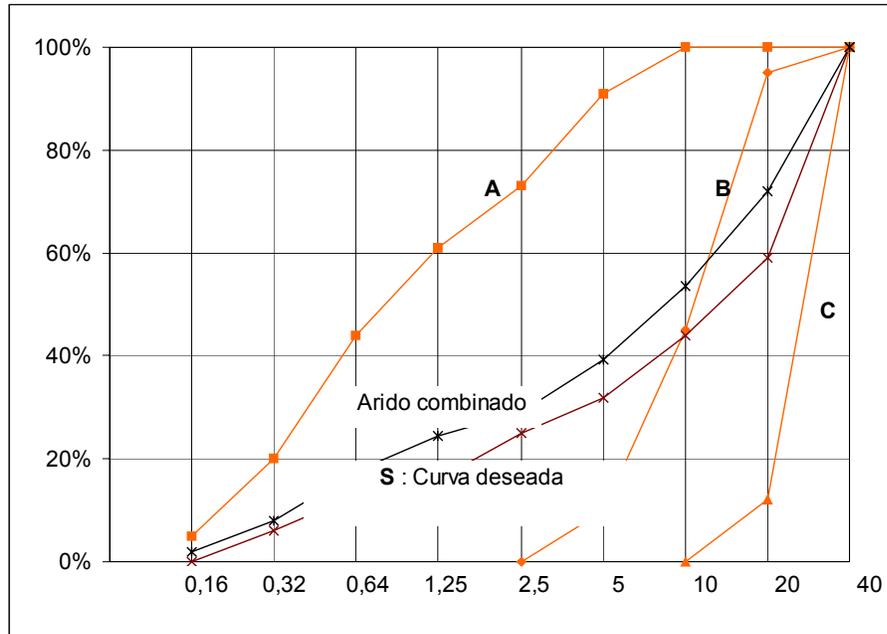
Este procedimiento sirve como una primera aproximación ya que produce un ajuste deficiente y depende de la relación entre las granulometrías de los áridos y las mallas de verificación seleccionadas.



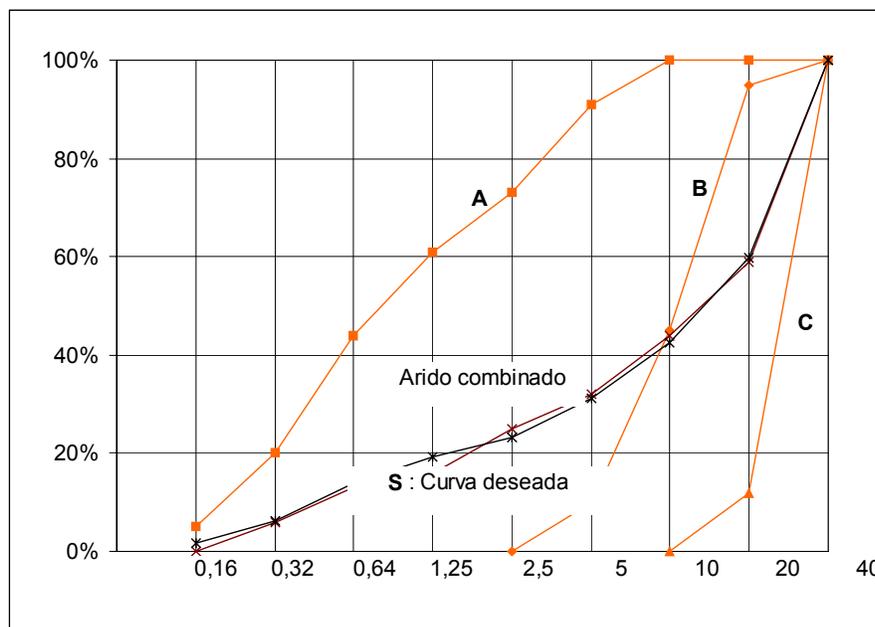
Método de los Mínimos Cuadrados.

Este método consiste en minimizar el cuadrado de las diferencias entre una curva objetivo y otra obtenida con parámetros α_0 , β_0 y $\gamma_0 = 1 - \alpha_0 - \beta_0$ iniciales.

Por ejemplo, con $\alpha_0 = 40\%$, $\beta_0 = 30\%$ y $\gamma_0 = 1 - 40\% - 30\% = 30\%$.



Utilizando un sistema computacional para resolverlo rápidamente se obtiene:
 $\alpha = 32\%$, $\beta = 24\%$ y $\gamma = 44\%$





• CONDICIÓN DE TAMAÑO MÁXIMO DEL ÁRIDO (FAURY)

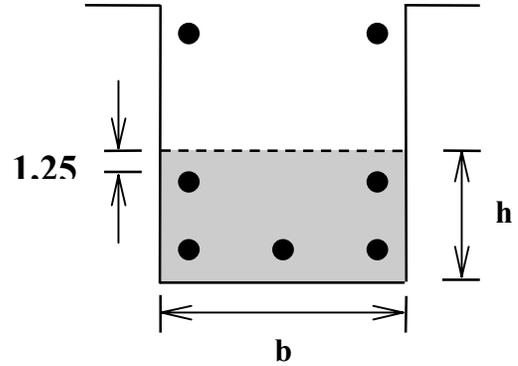
RADIO MEDIO DE MOLDAJE

$$R = \frac{\text{SECCIÓN HORMIGÓN (neta)}}{\text{PERÍMETRO (molde + armadura)}}$$

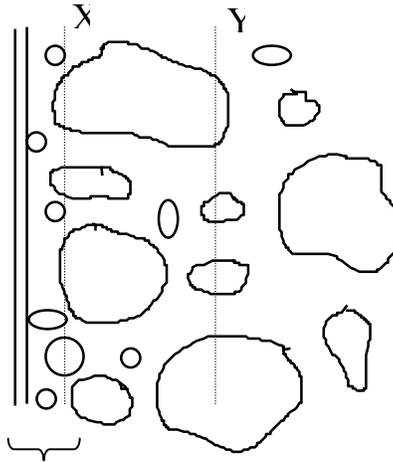
$$S = bh - n\pi \frac{\phi^2}{4}$$

$$P = b + 2h + n\pi\phi$$

$$0,64 \times R < D < 0,80 \times R$$



Efecto Pared (Caquot) : Anisotropía



Granulometría más fina



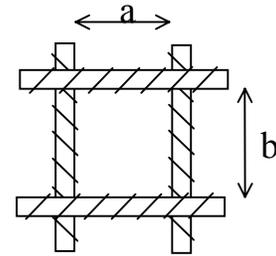
Menor densidad

Menor



RADIO MEDIO DE ARMADURAS

$$\rho = \frac{\text{Superficie de pasada}}{\text{Perímetro de pasada}} = \frac{ab}{2(a+b)}$$



$$D \leq 1,12 \rho \text{ (en rodados)}$$

$$D \leq 0,96 \rho \text{ (en chancados)}$$

Para barras paralelas a distancia e : $\rho = \frac{1}{2} \times e$

$$D \leq 0,56 e \text{ (rodado)}$$

$$D \leq 0,48 e \text{ (chancado)}$$

En Pavimentos de altura h

$$D < \frac{1}{4} h$$

NORMA NCh 170

$$D < \begin{cases} \frac{1}{5} \text{ de la menor dimensión interna del encofrado} \\ \frac{3}{4} \text{ del espacio libre entre armaduras} \\ \frac{1}{3} \text{ del espesor de las losas armadas} \end{cases}$$

Tabla 5. Tamaño máximo recomendado [mm]

Dimensión mínima de la sección cm	Tamaño Máximo Recomendado en [mm.]			
	Muros armados, vigas y pilares	Muros sin armadura	Losas muy armadas	Losa débilmente armada o sin armadura.
6 - 12	10 - 20	20	20 - 25	20 - 40
12 - 30	20 - 40	40	25 - 40	40 - 75
30 - 70	40 - 75	75	40 - 75	75
> 70	40 - 75	150	40 - 75	75 - 150



Efecto del tamaño máximo del árido

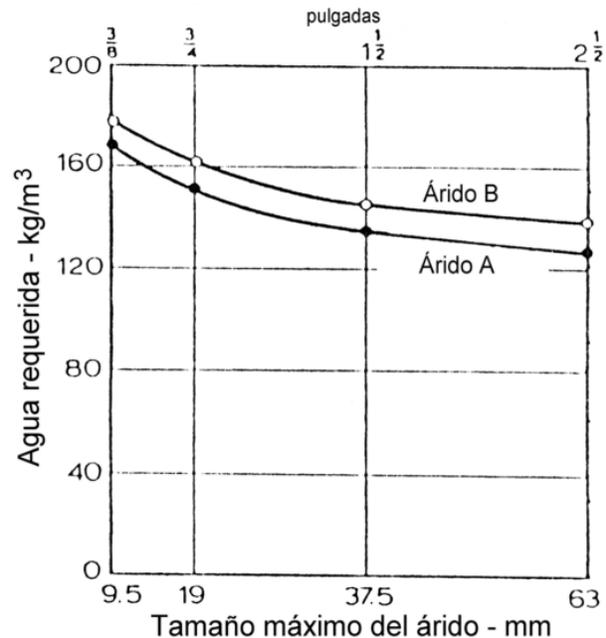
- **En la trabajabilidad :**

A mayor D_n , el árido tiene menor superficie específica.



Disminuye la dosis de agua requerida para obtener un cono dado.

Figura 8. Efecto del tamaño máximo del árido en el agua requerida en la mezcla para un descenso de cono constante.



- **Resistencia**

Si la dosis de cemento se mantiene constante, a una razón W/C menor, se obtiene una mayor resistencia.

Generalmente se considera recomendable usar D_n _{máx} compatible con las dimensiones del elemento.

Límite $D_n = 40$ mm.

(dominante la disminución de agua)

Los efectos negativos sobre $D_n = 40$ mm se deben :

- Menor adherencia en la superficie
- Mayor heterogeneidad del hormigón
- Mayor costo de apilamiento
- Problemas en el transporte
- Riesgo de segregación
- Depende de la riqueza de la mezcla.

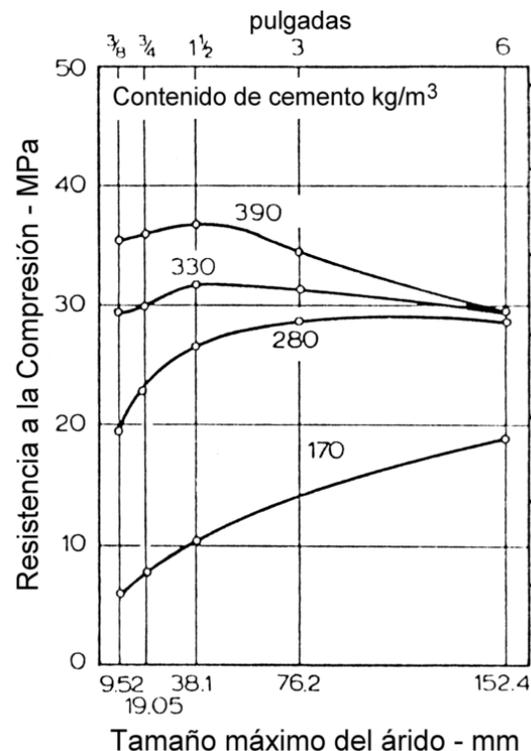


Figura 9. Efecto del tamaño máximo del árido en la resistencia a la compresión a los 28 días a diferentes riquezas de la mezcla.



• CONDICIÓN DE CONTENIDO DE GRANOS FINOS

Los granos finos son partículas de diámetro menor 0,080 mm.

En general se presentan como recubrimiento de la superficie del árido.

Consecuencias de un contenido excesivo de limos, arcillas y polvo de chancado :

- Aumenta el requerimiento de agua en el hormigón (debido al aumento de superficie específica).
- Interfieren el proceso de cristalización de la pasta de cemento (debido a la actividad iónica superficial).
- Interfieren en la adherencia del árido con la pasta de cemento.

Todas estas consecuencias se traducen en una menor resistencia y mayor retracción del hormigón.

Curva Granulométrica	Contenido de polvo como porcentaje del árido total	Razón Agua/Cemento para ...		
		Trabajabilidad baja	Trabajabilidad media	Trabajabilidad alta
1	0	0,612	-	-
	3,0	0,618	-	-
	6,0	0,634	-	-
	9,0	-	0,700	0,750
	12,0	-	0,730	0,760
2	0	0,630	-	-
	3,5	0,635	0,715	-
	7,0	0,648	0,715	0,750
	10,5	0,653	0,720	0,745
	14,0	-	0,720	0,750
3	0	0,665	0,735	0,780
	4,2	0,665	0,725	0,758
	8,4	0,682	0,735	0,766
	12,6	0,695	0,740	0,770
	16,8	0,740	0,775	0,790
4	0	0,713	0,713	0,820
	4,8	0,720	0,720	0,825
	9,6	0,732	0,732	0,825
	14,4	0,765	0,805	0,830
	19,2	0,807	0,835	0,850



Según la norma chilena NCh1223 Of77 , el contenido de granos finos se determina del porcentaje de pérdida de masa inicial de una muestra de ensayo seca, por lavado y tamizado.

$$F = \frac{m_a - m_d}{m_a} 100$$

F : contenido de finos [%]

m_a : masa de árido seco antes de lavar [g]

m_d : masa de árido seco después de lavar [g]

De acuerdo a la norma chilena NCh163 Of79 , los límites aceptables para el contenido de finos son :

	Grava		Arena	
	Normal	Chancado	Normal	Chancado
Hormigón sometido a desgaste	0,5%	1,0%	3,0%	5,0%
Hormigón normal	1,0%	1,5%	5,0%	7,0%

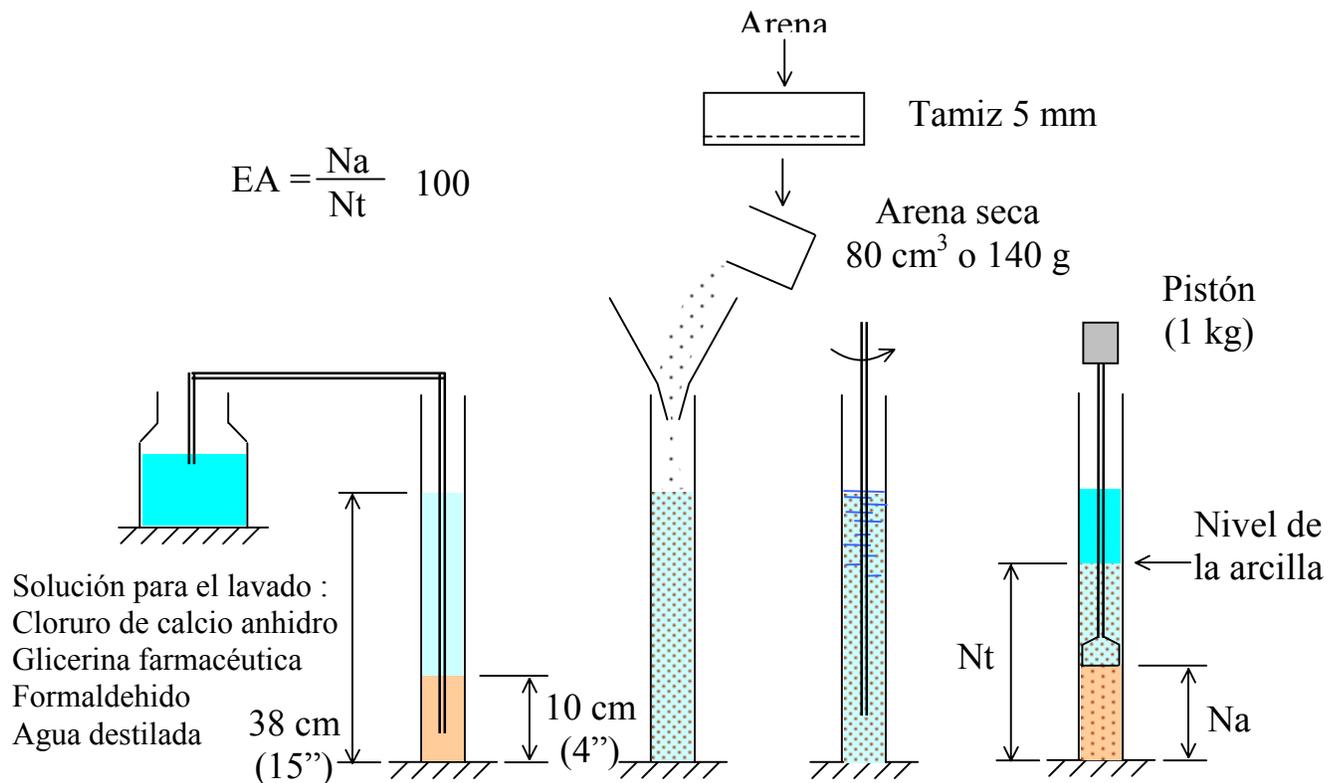
Comentarios

- El contenido de granos finos debe condicionarse con la dosis de cemento. Es posible aceptar mayores porcentajes para hormigones con dosis de cemento menor a 250 kg/m^3 , por ejemplo, un hormigón rodillado con 10 al 12% de finos se mejora la plasticidad de la mezcla.
- Influye naturaleza de los granos (limos-arcillas). Las arcillas tienen mucha actividad iónica superficial.
- Influye forma en que se presentan (adheridos o sueltos). Es posible eliminar los finos sueltos por lavado en planta procesadora, no así los adheridos.
- Prueba final en hormigón.



Ensayo equivalente de arena (NCh1325 Of78)

- Indica la proporción en volumen entre los elementos granulares y arcillas (sueltas o adheridas) de un árido.
- Solución con coagulantes (unen arcillas), detergentes (desprenden finos adheridos) y dispersantes (magnifican los finos en proporción a su actividad).
- Equivalente de arena (EA) es el porcentaje de arena inerte en volumen.



Se recomienda no usar arenas con EA menor al 80%. (el 80% del volumen de la probeta de ensayo es arena limpia).



• CONDICIÓN DE POROSIDAD

La porosidad esta relacionada con la absorción.

Afecta la trabajabilidad por la dificultad de controlar el estado de humedad y el agua realmente absorbida por los áridos durante la fabricación.

Ensayo según NCh1239 Of77 (en arenas) y NCh1117 E Of77 (en gravas).

$$A = \frac{P_{sss} - P_s}{P_s} 100$$

De acuerdo a la norama chilena NCh163 Of79, los límites aceptables de la absorción son : (recomendable : 1%)

Grava $\leq 2\%$

Arena $\leq 3\%$

Inconvenientes de una alta absorción :

- Variabilidad del hormigón producido
 - Dificultad en el control de la dosis de agua.
 - La cantidad de agua absorbida depende de las condiciones de empleo en obra : Orden de vaciado en betonera (debido al recubrimiento de la grava con pasta de cemento), tiempo de espera ente la elaboración y la colocación, ubicación de los acopios (si el árido esta al aire la humedad total es menor a la absorción).
 - La cantidad de agua absorbida depende del tipo de árido : La absorción de un árido rodado es mayor a la absorción de un árido chancado.
- Alterabilidad por agentes atmosféricos
 - ASTM C 88-66 : La reducción del tamaño de las partículas por un ciclo alternado de inmersión en solución de sulfato de sodio o magnesio y secado en horno.

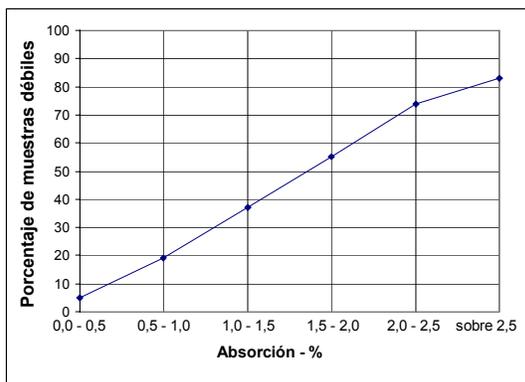


Figura 10. Distribución de muestras de áridos inalterables (resistentes intemperismo) y débiles como función de la absorción.



• CONDICIÓN DE FORMA Y TEXTURA DE LOS GRANOS

Defectos en la forma de los granos producen dificultad de colocación :

Se compensa con exceso de finos (cemento y arena) y agua, disminuyendo las resistencias mecánicas y aumentando las deformaciones por retracción. También se puede compensar con aire incorporado aunque disminuye la resistencia.

Los granos de forma irregular considerados defectuosos y tolerados sólo en pequeñas cantidades.

Usar partículas lo más esféricas o cúbicas posibles.

Influencia de la forma de los granos finos más acentuada que la del grueso.

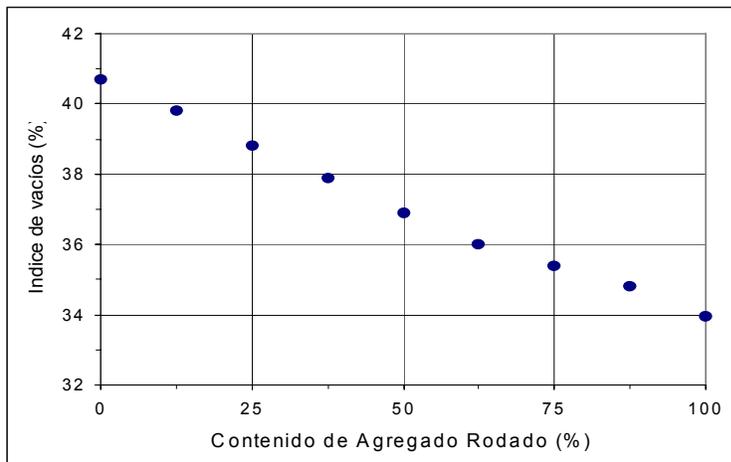
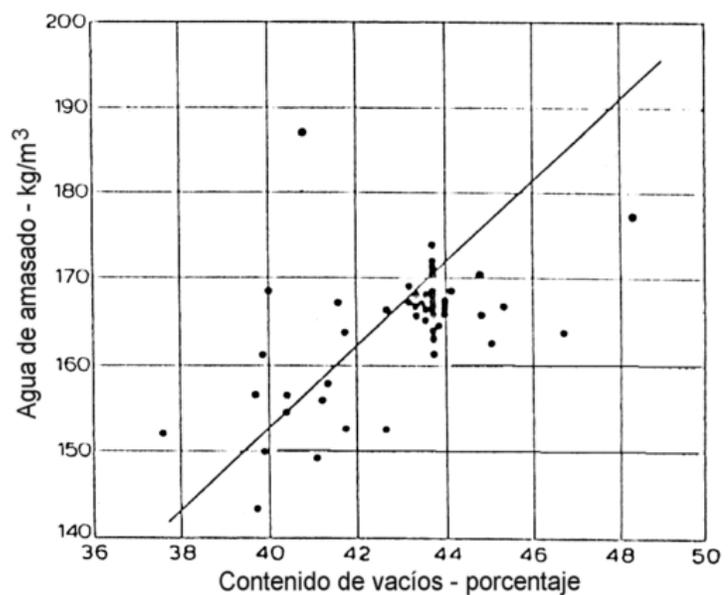


Figura 11. Influencia de la angularidad del agregado en el índice de vacíos.

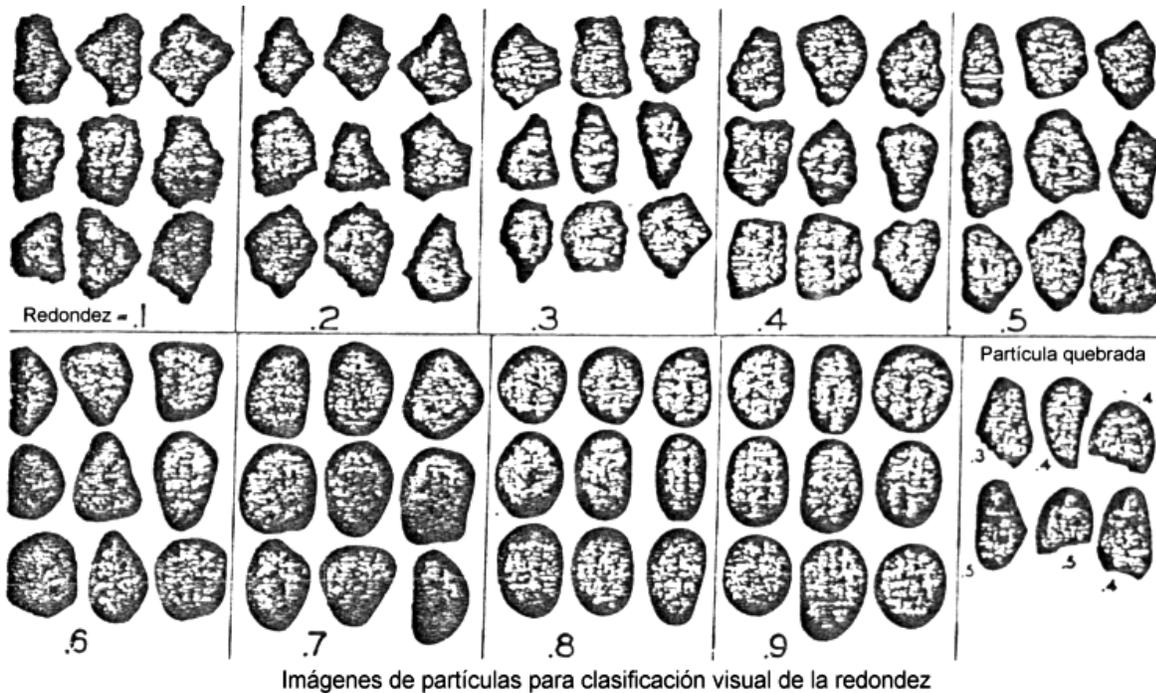
Figura 12. Relación entre el contenido de vacíos de la arena en el agua requerida por el hormigón hecho con la arena dada.





Indices más usados

Redondez (cualitativo)





Número De Angularidad

Grado de empaque de las partículas unidimensionales depende de su forma.
Aplicable a gravas y arenas.

$$\begin{aligned} \text{NA} &= \% \text{ Huecos} - 33 \\ &= 67 - \% \text{ Volumen sólidos} \end{aligned}$$

$$\% \text{ Huecos} = \frac{D_r - D_a}{D_r} * 100\%$$

Mide el porcentaje de huecos en exceso del correspondiente a una grava redonda.

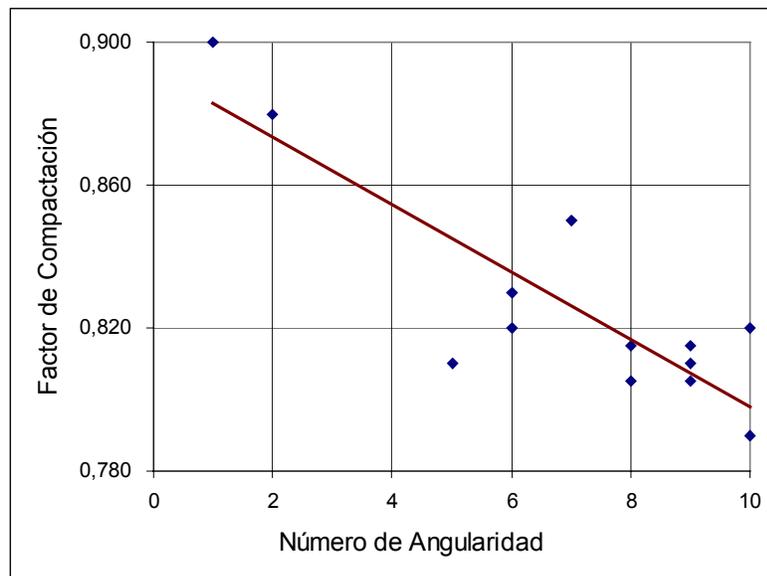
A mayor Número de Angularidad más angular es el árido.

El Número de Angularidad de esferas = 0

En ensayo está normalizado por la norma BS 812:1975

La angularidad es estimada según proporción de huecos de muestra compactada en forma estándar.

Tamaño de las partículas usadas en el ensayo : (20 – 14 mm); (10 – 6,3 mm); (6,3 – 5 mm)



La relación entre el número de angularidad del árido y el factor de compactación del hormigón hecho con el árido.

RECOMENDADO : NA = 0 a 11



Coefficiente Volumétrico.

Caracteriza la redondez de las partículas por comparación con esferas.
Aplicable a áridos gruesos.

$$CV = \frac{\text{Volumen de los granos}}{\text{Volumen esferas circunscritas}} = \frac{\sum v_i}{\sum V_i}$$

donde : v_i : volumen de la partícula

V_i : volumen de la esfera circunscrita = $\frac{D_i^3}{6}$

$$CV = \frac{1,91 \sum v_i}{\sum D_i^3}$$

A mayor CV es árido es más redondo.

El CV de esferas = 1

Ensayo de coeficiente volumétrico : Norma NCh1511 Of80

- Se muestrean por cuarteo 20 a 50 piedras del árido retenido en malla 5 mm.
- Volumen de partículas se determina por diferencia entre el peso de la muestra (sss) al aire y bajo agua o por volumen de agua desplazada.
- Se mide la mayor dimensión de cada partícula con pié de metro.

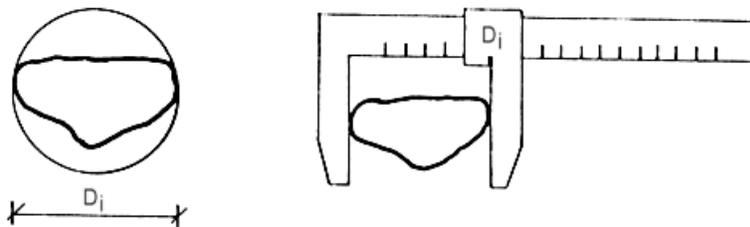


Tabla 6. Coeficiente volumétrico según NCh 163Of79

Tipo Hormigón	Árido Tamaño Máximo Absoluto	
	> 25 mm	< 25 mm
Simple	> 0,15	> 0,12
Armado	> 0,20	> 0,15

RECOMENDADO : CV = 0,15 a 0,20

Máximo 1,0



Factor De Forma

Granos elongados y escamosos disminuyen la trabajabilidad por alta superficie específica.

Partículas escamosas tienden a orientarse en un plano y se forman huecos con agua acumulada bajo ellas con una disminución en la durabilidad del hormigón.

Definiciones :

Partículas planas si : espesor $< 0,6$ *tamaño medio del tamiz correspondiente.

Partícula alargada si : largo $< 1,8$ *tamaño medio del tamiz correspondiente.

Tamaño medio del tamiz : media aritmética del tamaño el tamiz que retiene la partícula y del que la deja pasar.

Alemán : Razón de elongación : $q = \frac{\text{Largo}}{\text{Ancho}}$
(DIN 1226)

Grano largo u elongado si $q > 1,5$ (DIN) ó $> 1,8$ (BSI)

Razón de planeidad : $p = \frac{\text{Espesor}}{\text{Ancho}}$

Grano plano o escamoso si $p < 0,5$ (DIN) ó $< 0,6$ (BSI)

Discos	Equidimensionales	$q = 0,55$ \downarrow Alargada
Espadas	Cilindros	
$p = 0,6$ Plana ←		

Inglés : Índice de laminación : $FI = \frac{\text{Peso de las partículas planas}}{\text{Peso de la muestra}} * 100\%$
(BS 882)

Índice de elongación : $EI = \frac{\text{Peso partículas elongadas}}{\text{Peso de la muestra}} * 100\%$

RECOMENDADO : DIN : $\leq 50\%$ partículas defectuosas del peso total y, que el promedio de 25 granos ($> 8\text{mm}$) no sea largo ni plano.

BS : Hormigones H20 a H35 FI < 50 en grava rodada
 < 40 en grava chancada

Hormigones $> H35$ FI < 35

Se recomienda que presencia de granos elongados y escamosos sea menor que el 10 a 15% de la masa del árido grueso.



Coeficiente De Forma (Francés)

Aplicable a granos gruesos
El grano bueno cumple :

$$\text{largo} + \text{ancho} < 6 * \text{espesor}$$



Cribas de exfoliación ⇒ Ancho



Galga de espesores ⇒ Espesor



Galga de longitudes ⇒ Largo

Método útil para recepción de los materiales en obra.

RECOMENDADO : No más de 20% de granos defectuosos

Contenido De Conchuela

Los áridos de mar pueden contener conchuela.

Es necesario controlar el contenido por ser frágiles y reducir trabajabilidad.

El método de ensayo está normalizado por BS 812 : Part 1 : 1975

Pesar conchas y fragmentos de conchuela extraídos a mano de una muestra de árido mayor que 5 mm.

Requisitos BS 882 : 1983

RECOMENDADO : $\leq 20\%$ para árido de $D_n = 10$ mm unidimensional y para árido integral $5 \text{ mm} \leq D_n \leq 10 \text{ mm}$.

$\leq 8\%$ para áridos unidimensionales o integrales $> 10 \text{ mm}$.



Textura Superficial

Estimación visual confiable.

Clasificación BS 812 : PART 1 : 1975

Grupo	Textura de la superficie	Características	Ejemplos
1	Vidrioso	Fractura concoidal	
2	Liso	Gastado por el agua, Fractura mostrando granos redondeados más o menos uniformes.	
3	Granular	Fractura rugosa de granos finos o medianos conteniendo constituyentes cristalinos no visibles fácilmente.	
4	Áspero	Contiene constituyentes cristalinos fácilmente visibles	
5	Cristalino	Con poros y cavidades visibles	
6	Nidos de abeja		



• **CONDICIÓN DE RESISTENCIA INTRÍNSECA**

Ensayos indirectos para determinar la resistencia de árido.

➤ *Condición de Resistencia a la Ruptura de Muestras de Roca*

Ensayo de resistencia a la compresión de cilindros de roca.

Norma de ensayo : BS 812 : 1975

Poco usados por dificultad y costo de la preparación de las muestras.

Mide la calidad de la roca madre y no la calidad del árido usado en el hormigón.

El resultado es afectado por planos débiles de las rocas.

Debilidad de la roca \Rightarrow debilidad del árido.

La resistencia del árido (200 MPa) es mayor que la resistencia del hormigón (hasta 50 MPa) donde la falla se debe a concentraciones de tensiones en los punto de contacto.

Los áridos rígidos pueden inducir agrietamiento de la pasta de cemento por cambios volumétricos (térmicos e hídricos).

Ensayo se realiza en general sobre una muestra seca al horno aunque eventualmente se usa muestra mojada :

$$\text{Efecto Ablandamiento} = \frac{\text{Resistencia muestra húmeda}}{\text{Resistencia muestra seca}}$$

Si es alto la roca tiene una baja durabilidad.

➤ *Comportamiento del árido en el hormigón*

Experiencia previa con el árido en cuestión.

Prueba del árido en dosis de hormigones de resistencia conocida con otros áridos.

Si la resistencia del hormigón con el árido bajo prueba es menor y si gran número de partículas del árido aparecen fracturadas :

- La resistencia del árido es más baja.
- Usar en hormigones de menores resistencias.

Ensayos a largo plazo de hormigones.



➤ **Condición de Resistencia del Árido a Granel**

Ensayo de Trituración.

Se mide la resistencia a compresión confinada.

Ensayos para Gravas :

Valor de trituración del árido (Aggregate crushing value : ACV)

Este ensayo está especificado en la norma BS 812:1975

Aparato para el aplastamiento de áridos (EL42-430), comprendiendo un cilindro de acero, con diámetro nominal de 150 mm, émbolo y placa base. Todas las superficies que estarán en contacto con el árido están cementadas a un valor BS 427 de 650. El aparato cumple la norma de BS 812.

Medida metálica, 115 mm de diámetro x 180 mm de profundidad. Peso 2 kg. Varilla de apisonado.

Procedimiento :

Se tamiza el material a probar entre mallas ASTM 1/2" (14 mm) y 3/8" (10 mm).

Se seca la muestra en horno a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ por 4 horas.

Se coloca la muestra en el molde cilíndrico y compacta según especificación

Se aplica un émbolo encima del árido.

Se ensaya en máquina de compresión: 400kN aplicadas en 10 min

Se tamiza el árido en malla ASTM N°8 (2,36mm)

El valor ACV se calcula como :

$$\text{ACV} = \frac{\text{Masa material que pasa malla N}^\circ 8}{\text{Masa total muestra}} * 100\%$$

Las partículas de mayor o menor tamaño dan mayor o menor ACV que el estándar, respectivamente.

Para áridos débiles (ACV > 25 a 30%), el ensayo es poco sensible a variaciones de resistencia del árido por efecto de la trituración y compactación antes de llegar a la carga máxima.



Valor el 10% de finos

Este ensayo está especificado en la norma BS 812:1975

Procedimiento :

Se determina la carga requerida para producir un 10% de trituración a una muestra secada al horno igual al ensayo ACV.

Se aplica carga progresivamente creciente sobre el émbolo de modo de producir las siguientes penetraciones en 10 minutos :

15 mm para áridos rodados.

20 mm para áridos chancados

24 mm para áridos con nidos de abeja.

Una variación consiste en realizar el ensayo en estado sss. Los finos deben secarse a masa constante o por 12 horas a 105 °C.

El valor se calcula como :

$$\text{Carga necesaria para producir 10\% de finos menores a la malla N}^\circ 8 = \frac{14 x}{y + 4}$$

Donde : x : carga máxima aplicada [ton].

y : porcentaje real de finos medidos para x toneladas.

Mayor valor de la carga corresponde a una mayor resistencia del árido.

Los valores recomendados por la BS 882:1983 son :

≥ 150 kN en hormigón de terminación de pisos de tráfico pesado.

≥ 100 kN en hormigón sometido a desgaste

≥ 50 kN en hormigones normales



Ensayo para arenas :

Ensayo de trituración de Campus y Jaquemin

Mide la robustez estructural de la arena

Correlaciona con resultados ensaye desgaste Los Angeles.

Procedimiento

Se tamiza la arena entre mallas ASTM N°4 (4,75 mm) y N°16 (1,25 mm).

Se tamiza la arena entre mallas ASTM N°16 (1,25 mm) y N°50 (0,30 mm).

Se introducen, individualmente, 500 gr de cada fracción de arena en un cilindro de acero y se coloca un pistón de contratapa de 113 mm de diámetro.

Se coloca en prensa de compresión, cargándolo con presión creciente a velocidad constante de 0 a 400 kg/cm² en un minuto.

Se mantiene la presión de 40 toneladas durante 4 minutos.

Se saca la arena y tamiza en mallas N°50 (0,30 mm) y N°100 (0,15 mm).

Se determina masa y porcentaje molido para cada fracción de arena individual.

Cálculo del porcentaje de finos :

Se suman los porcentajes de cada fracción dando un indicador.

Este inicaor se compara con los de arena conocidas.

$$\text{Porcentaje de Finos} = \frac{\text{Masa material que pasa malla N}^\circ 100}{\text{Masa inicial de la muestra}} * 100\%$$

Ejemplo indicadores

ARENA	Malla 4/16	Malla 16/50	Indicador
Arrip	5,8	11,6	17,4
Maipo	4,8	18,0	22,8
Agrep	9,2	17,4	26,6
Pirque	16,6	26,4	43,0



Ensayo de Tenacidad.

Valor de resistencia al impacto del árido (AIV)



Resistencia del árido a falla por impacto.
El ensayo está especificado por la norma BS 812:1975

El tamaño máximo de partículas igual al ensayo ACV
Impacto de un martillo estandar que cae 15 veces bajo su propio peso.

Se mide el porcentaje de finos que pasan la malla ASTM N°8 (2,36 mm)

Como la tenacidad esta relacionada con el ensayo ACV los hace ensayos alternativos.

Una variación consiste en realizar en ensayo en estado sss.

Valores recomendados por BS 882:1983 para el ACV y AIV :

≤ 25% en hormigón de terminación de pisos de tráfico pesado

≤ 30% en hormigón sometido a desgaste

≤ 45% en hormigones normales

Ensayo de Dureza.

Se mide la resistencia a la indentación.

Ensayo de Desgaste.

Propiedad importante para hormigón de pisos y caminos.

Valor de abrasión del árido a granel (AAV)

Este ensayo está especificado en la norma BS 812:1975

Procedimiento :

Se tamizan para que el tamaño de partículas esté ente 14 a 20 mm.

Se colocan en bandeja en una capa simple usando un compuesto de pega.

Se somete a abrasión en la máquina estándar, aplicando 500 revoluciones mientras se vierte continuamente una arena monotamaño a velocidad especificada.

El valor AAV se calcula como el porcentaje de pérdida de masa debido a la abrasión.

Un valor alto indica una baja resistencia a la abrasión.



Método de la máquina de Los Angeles

Este método consiste en analizar la granulometría el árido grueso sometido a abrasión y se expresa la pérdida de masa del material como el porcentaje de la masa inicial de la muestra.

Este ensayo está especificado en la norma NCh 1369Of78



Procedimiento :

Se coloca el árido de granulometría especifica (Mi) en el tambor cilíndrico montado horizontalmente, con un anaquele en el interior.

Se añade una carga de bolas de acero y se aplica un número especificado de revoluciones.

Completado el ciclo se saca el material y tamiza por mallas 2,5 mm y 1,6 mm.

Se reúne el material retenido, lava y seca a masa constante y se enfría (Mf).

El valor LA se calcula como :

$$LA = \frac{Mi - Mf}{Mi} * 100 (\%)$$

Los valores admisibles según la norma NCh 163Of79 :

≤ 40 % en hormigones sometidos a desgaste

≤ 50% en hormigones normales

Método de norma ASTM C 131-69

Aplicable a áridos de distintos tamaños

Igual desgaste variando el peso e la muestra, carga de bolas y número de revoluciones.



➤ **Condición de Partículas Blandas y Desmenuzables.**

Determinación de partículas desmenuzables (NCh 1327Of77)

La proporción de partículas desmenuzables tiene relación con la resistencia mecánica del árido propiamente tal y con la capacidad del árido de permanecer inalterable a través el manejo, transporte y amasado.

Ensayo

El procedimiento consiste en eliminar las partículas desmenuzables e una muestra de ensayo mediante inmersión en agua, compresión y lavado y calcular el contenido e partículas desmenuzables como porcentaje de pérdida de masa de la muestra con respecto a una masa inicial.

La muestra se secará hasta masa constante a $110 \pm 5^\circ\text{C}$ y se compondrá de los tamaños que se indican en la Tabla 6. Inmersión en agua destilada durante 24 ± 4 horas. Deshacer las partículas desmenuzables comprimiéndolas y frotándolas entre los dedos.

Tabla 7. Tabla 6

Material		Tamaño de partículas [mm]	Masa mínima [gramos]	Tamiz para separar residuo
Arena		1,25 – 5	100	0,8
Grava fracción N°	1	> 40	5000	5
	2	20 – 40	3000	5
	3	10 – 20	2000	5
	4	5 – 10	1000	2,5

Cálculos

Cálculos en la Arena

$$P = \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad 100 \%$$

Cálculos en la Grava

Calcular el porcentaje ponderado de pérdida de masa de cada fracción de la muestra, de acuerdo a la fórmula siguiente, aproximando al 0,1%

$$P_n = \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad \text{ppr } \%$$

P_n : porcentaje ponderado de pérdida de masa de cada fracción de la grava (P_1 , P_2 , P_3 y P_4):



ppr : porcentaje parcial retenido correspondiente a la fracción según el análisis granulométrico, %.

Si en el análisis de una grava hay fracciones no ensayadas, se considerará que tienen una pérdida igual a la pérdida promedio entre las fracciones superior e inferior. Si se trata de una fracción extrema (fracciones 1 y 4) se considerará que tiene una pérdida igual a la de la fracción más próxima.

Se calcula el contenido de partículas desmenuzables en la grava como el porcentaje de pérdida de masa de la muestra, de acuerdo a la fórmula siguiente, aproximado a 0,1%.

$$P_n = P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \%$$

Valores admisibles según NCh 163Of79:

$$\text{Grava} \leq 5\%$$

$$\text{Arena} \leq 3\%$$

Ejemplo

Determinación de partículas desmenuzables.

Arena

$$\text{Masa inicial} \quad m_i = 432 \text{ [g]}$$

$$\text{Masa final} \quad m_f = 408 \text{ [g]}$$

$$P = \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad 100 = \frac{432 - 408}{432} \quad 100 \%$$

$$P = 5,6\%$$

Grava

$$P_n = \frac{m_i - m_f}{m_i} \quad \text{ppr} \%$$

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4$$

Fracción	Tamaño [mm]	Ppr [%]	mi [gramos]	mf [gramos]	mi - mf mi	Pn
1	> 40	12	5325	4785	0,100	1,2
2	20 - 40	46	3218	2938	0,087	4,0
3	10 - 20	4	---	---	0,075	0,3
4	5 - 10	38	1080	1012	0,063	2,4
P =						7,9



Nota : La fracción N°3 de la grava no se ensaya ya que su ppr es < 5%
Para calcular el cociente de las masas e la fracción N°3 se saca el promedio entre los valores de la fracción N°1 y N°4.

$$\frac{m_i - m_f}{m_i} = \frac{0,087 - 0,063}{2} = 0,075$$

➤ ***Adherencia.***

No existen ensayos aceptados
Forma y textura de los áridos (más angulares y rugosos) tienen mejor adherencia con la pasta de cemento.



• CONDICIÓN DE ESTABILIDAD

➤ *Estabilidad Química*

NO INCORPORACIÓN DE PRODUCTOS NOCIVOS

IMPUREZAS : interfieren en el proceso de hidratación del cemento.

RECUBRIMIENTOS : impiden la adherencia del agregado con la pasta de cemento (ejemplo : arcillas).

PARTÍCULAS DÉBILES O INESTABLES : disminuyen la resistencia (ejemplo : partículas esmenuzables).

Impurezas Orgánicas (Arenas)

Materia orgánica en arenas (caso más frecuentes)

Origen : Degradación materia vegetal.

Efecto : Retardo fraguado y endurecimiento por ácido tánico.

Ensayos : Colorímetro NCh 166Of52

Inmersión solución al 3% NaOH por 24 horas.

El color de la solución indica el contenido de materia orgánica.

Amarillo Claro .. → Rojo → .. → Café Oscuro

Más oscuro refleja mayor contenido e materia orgánica.

Comparación de resistencia con hormigón sin materia orgánica

> 95% Resistencia sin materia orgánica

Requisito : (NCh 163-Arena) Aceptar si es transparente o color amarillo claro.

Solución : Dejar arena en lugar seco y expuesta al aire libre.

Lavado con agua con cal o sustitución 5% peso de cemento por cal.

Mantener curado por mayor tiempo.

Contaminación Con Sales

Origen : Arenas de playa y estuarios de ríos.

Depósitos sobre nivel máximo aguas peligrosas (6%)

En general arenas el fondo del mar no tienen porcentajes peligrosos.

Efecto : Corrosión en hormigón armado.

Eflorescencias del hormigón porque sales absorben humedad del aire.

Ensayo : NCh 1444Of80

Requisito : (NCh 163)

Sulfatos y Sulfuros : provocan reacciones expansivas con el cemento.

Sulfatos (ión SO_4) $\leq 0,60 \text{ kg/m}^3$



Sulfuros (ión SO_4) $\leq 1,80 \text{ kg/m}^3$

Cloruros : favorecen corrosión armadura y aceleran el fraguado.

Cloruros (ión SO_4) $\leq 1,20 \text{ kg/m}^3$ para hormigón armado.

$\leq 0,25 \text{ kg/m}^3$ para hormigón pretensado.

Solución : Remover lavando con agua fresca.

CARBÓN Y LIGNITO

Efecto : Causan manchas y escamaciones superficiales que afectan la apariencia.

En grandes cantidades (> 2 a 5% de la masa del árido) afectan la resistencia

No deben aceptarse en hormigones sometidos a desgaste.

Ensayo : NCh 170 y ASTM C 123-83

Requisito : (NCh 163)

$\leq 0,5 \%$ para hormigón a la vista.

$\leq 1,0 \%$ para otros hormigones.



INALTERABILIDAD ANTE COMPUESTOS FRAGUADO PASTA

Los áridos pueden contener componentes combinables con los compuestos del fraguado de la pasta.

Existen componentes potencialmente peligrosos :

- Sílice amorfa : ópalo, calcedonia, vidrios volcánicos.
- Sulfatos y sulfuros de calcio y fierro
- Arcillas expansivas
- Calizas olomíticas.

Reaccionan produciendo compuestos expansivos

El caso más estudiado es la **Reacción Alkali-Árido**

Efecto : Áridos con sílice amorfa y los álcalis presentes en el cemento (K_2O , Na_2O , $Ca(OH)_2$) producen un gel de álcalis expansivo más silicatos El gel reacciona con el agua y aumenta de volumen provocando tensiones internas y el posterior agrietamiento y ruptura de la pasta de cemento.

El contenido mínimo de álcalis del cemento para producir la reacción expansiva es de: 0,6% expresado en Na_2O ($Na_2O + 0,658 * K_2O$)

Ensayos : Análisis petrográfico (ASTM C 295)

Detecta presencia de componentes potencialmente reactivos.

Método químico (ASTM C 285)

Determinación del sílice disuelto Sc y la reactividad alcalina Rc

Si $Rc > 70$ y $Sc > Rc$ } El árido es reactivo
 ó $Rc < 70$ y $Sc > 35 - 0,5Rc$ }

Método de prismas de mortero (ASTM C 227)

Se analiza el árido con un cemento con alto contenido de álcalis.

Si la Expansión $> 0,05\%$ a 3 meses } El árido es reactivo
 ó $> 0,10\%$ a 6 meses }

En Chile :

No se ha informado de situaciones ciertas de existencia de daños en obras causados por la reacción álcali-árido. Sin embargo, dada la existencia de partículas de origen volcánico (curso alto de los ríos) hace recomendable su verificación en áridos desconocidos.

La Puzolana y la escoria de alto horno, aunque tienen niveles altos de álcalis, no toman parte de la reacción álcali-árido. Más aún, en la puzolana, el sílice atenúa los efectos nocivos de la reacción.



➤ *Estabilidad Física*

Resistencia a cambios de volumen por variaciones ambientales.

Causas físicas de cambios volumétricos grandes y permanentes del árido :

Ciclos hielo-deshielo.

Ciclos alternados de humedad y temperatura.

CICLOS HIELO - DESHIELO

Este es el caso más importante.

El proceso está ligado a la porosidad del hormigón.

Ensayos :

Desintegración con sulfato de sodio o magnesio

(NCh 1328 Of77 y ASTM C 88-83)

Procedimiento :

Reproducir la granulometría estándar.

Sumergir en solución a 20°C por 17 horas.

Secar hasta peso constante a 110°C

Repetir 5 ciclos de inmersión y secado.

Tamizar por fracciones.

Determinar la pérdida de masa.

Requisitos NCh 163 Of79

	con Sulfato de Sodio	con Sulfato de Magnesio
Grava	≤ 12%	≤ 18%
Arena	≤ 10%	≤ 15%

Ensayos en hormigón sometido a ciclos hielo-deshielo.

Ensayos no representan la realidad. Los informes de servicio real son los únicos que aprueban la durabilidad del árido.



PROPIEDADES TÉRMICAS

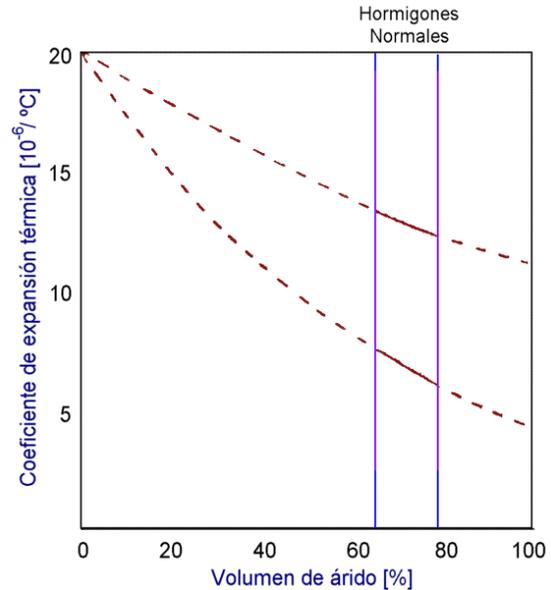
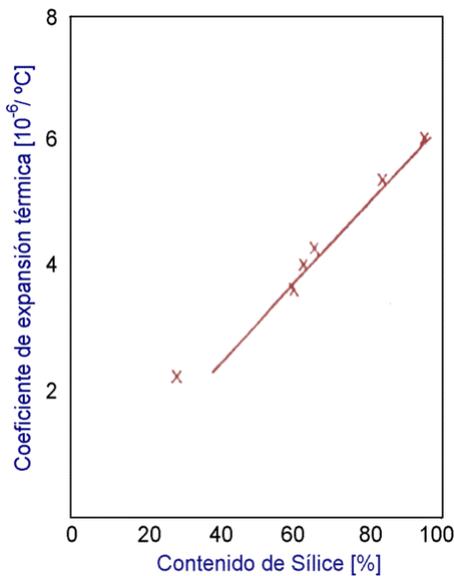
Coefficiente de expansión térmica.

Calor específico y Conductividad (importantes para hormigones masivos)

Coefficiente de expansión térmica

El coeficiente de expansión térmica del árido determina el valor para el hormigón.

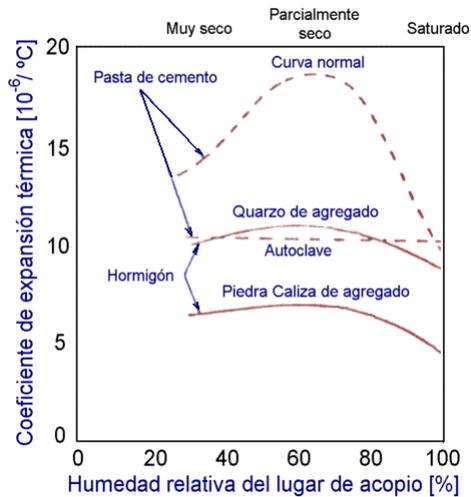
Influencia depende de la dosis del árido. En hormigones normales el efecto es limitado.



Tipo de roca	α_{roca} 10-6 / °C
Granito	1,8 – 11,9
Diorita y andesita	4,1 – 10,3
Gabro, basalto, diabasa	3,6 – 9,7
Arenisca	4,3 – 13,9
Dolomita	6,7 – 8,6
Piedra caliza	0,9 – 12,2
Horsteno	7,4 – 13,1
Mármol	1,1 – 16,0

$$\alpha_{\text{árido}} \approx 1 \text{ a } 16 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$$

α_{roca} generalmente aumenta con el contenido de sílice (grandes variaciones en un mismo grupo de rocas). El hormigón fabricado sigue el mismo patrón.



$\alpha_{\text{Cemento Portland}} \approx 10 \text{ a } 16 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$. Este valor depende del contenido de humedad :

Pasta saturada $\approx 10 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Pasta parcialmente saturada $\approx 19 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Pasta seca $\approx 14 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$.

Esto se debe a la expansión del gel al aumentar la absorción de agua. La edad y el curado al vapor disminuyen el efecto por cristalización del gel.

Si $\alpha_{\text{árido}}$ difiere más de $5,5 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$ del de la pasta de cemento perjudica la durabilidad del hormigón a ciclos hielo-deshielo.

Diferencias menores no afectan en el rango 4 – 60°C (retracción y creep)

La estimación del coeficiente de expansión térmica para áridos de madurez diferente :

$$\alpha_{\text{árido combinado}} = \alpha_{\text{árido grueso}} + (\alpha_{\text{arena}} - \alpha_{\text{árido grueso}}) \times \text{dosis de arena}$$



• REQUISITOS GENERALES NORMA NCH 163

Requisitos	Valores	Límites	Norma ensayo NCh
	Grava	Arena	
1.- Material fino menor que 0,080 mm. a) para hormigón sometido a desgaste % máximo	0,5	3,0	1223
b) para todo otro hormigón % máximo	1,0	5,0	
2.- Impurezas orgánicas referidas a color límite según patrón.	---	amarillo claro	166
3.- Granulometría	tabla 3	tabla 2	165
4.- Partículas desmenuzables % máximo	5,0	3,0	1327
5.- Partículas blandas % máximo	5,0	---	ver anexo E
6.- Cloruros como Cl^- (Kg/m^3 de hormigón) a) para hormigón armado (incluye todos los casos en que haya elementos de acero embebidos) % máximo	1,2		1444
b) para hormigón pretensado % máximo	0,25		
7.- Sulfatos y sulfuros como SO_4^{2-} (Kg/m^3 de hormigón): a) sulfatos solubles en agua % máximo	0,60		1444
b) sulfuros oxidables % máximo	1,80		
8.- Carbón y lignito: a) para hormigón a la vista % máximo	0,5	0,5	ver anexo E
b) para todo otro hormigón % máximo	1,0	1,0	



requisitos	valores	límites	norma
	Grava	Arena	ensayo NCh
9.- Resistencia a la desintegración (pérdida de masa en 5 ciclos de inmersión y secado)			
a) con sulfato de sodio			
% máximo	12	10	1328
b) con sulfato de magnesio			
% máximo	18	15	
10.- Resistencia al desgaste			
Máquina de“Los Ángeles”:			
a) para hormigón sometido a desgaste.			
% máximo	40	---	1369
b) para todo otro hormigón			
% máximo	50	---	
11.- Absorción de agua (porocidad)			
% máximo	2	3	1117 1239
12.- Coeficientes volumétricos medios:			
a) árido de tamaño máximo absoluto mayor que 25 mm:			
- para hormigón simple			
mínimo	0,15	---	
- para hormigón armado			
mínimo	0,20	---	ver anexo E
b) árido de tamaño máximo absoluto menor que 25 mm:			
- para hormigón simple			
mínimo	0,12	---	
- para hormigón armado			
mínimo	0,15	---	

INDICE

GENERALIDADES.....	3
• EFECTO DE LA TRABAJABILIDAD EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN.....	3
• EFECTO DE LA COMPACTACIÓN EN EL VOLUMEN DE HUECOS.....	4
CONDICIÓN DE TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO	5
• DEFINICIÓN.....	5
• FACTORES QUE AFECTAN LA TRABAJABILIDAD.....	7
➤ Dosis de Agua, Tamaño Máximo del Árido y Forma del Grano.....	8
➤ Áridos.....	11
➤ Finura del Cemento.....	13
➤ Aditivos.....	13
➤ Tiempo.....	15
➤ Temperatura.....	16
• MEDIDAS DE TRABAJABILIDAD	17
• MEDIDAS EMPÍRICAS DE LA TRABAJABILIDAD	18
➤ Asentamiento de cono de Abrams	18
➤ Ensayo de Bola Kelly.....	20
➤ Consistómetro Vebe (v. Bahrner, Suecia).....	22
➤ Factor de Compactación (Granville).....	23
➤ Ensayo Mesa Flujo (Flow Table Test: DIN y BS).....	24
➤ Factor de Compactación Din (Tarro Walz).....	25
➤ Mesa Powers (Remoulding Test).....	26
➤ Ensayo del cono invertido.....	27
➤ Medición de la Trabajabilidad en Terreno Usando Betonera.....	28
➤ Relación entre los métodos de ensayo de trabajabilidad.....	29
• REOLOGÍA DEL HORMIGÓN FRESCO	32
➤ Estudio Reológico del Hormigón Fresco.....	34
➤ Relación Modelo Reológico con Asentamiento Cono de Abrams	34
➤ Aplicación a la Trabajabilidad del Hormigón Fresco	36
➤ Viscosímetro Coaxial.....	38
PROCESOS DEL HORMIGÓN FRESCO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN	40
• SEGREGACIÓN.....	41
• EXUDACIÓN DEL AGUA DE AMASADO	43
• VARIACIONES DE VOLUMEN DEL HORMIGÓN FRESCO	47
• ASENTAMIENTO PLÁSTICO	48

- RETRACCIÓN PLÁSTICA..... 51
- FALSO FRAGUADO DEL CEMENTO..... 55
- CONTROL DEL HORMIGÓN FRESCO 56**

- FRECUENCIA DE MUESTREO SEGÚN NCH 170..... 56
- EXTRACCION DE MUESTRAS..... 56
- CONTROL DE ASENTAMIENTO DE CONO 56
- DENSIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO 57
- TEMPERATURA DEL HORMIGÓN FRESCO..... 58
- CANTIDAD DE AGUA EN EL HORMIGÓN FRESCO 58
- ÁRIDO GRUESO EN HORMIGÓN FRESCO..... 59
- CONTENIDO DE AIRE INCORPORADO 59

GENERALIDADES

CONCEPTO DE TRABAJABILIDAD

Es la propiedad de la mezcla que permite que el hormigón pueda ser elaborado, transportado, colocado y terminado con suficiente facilidad y sin segregación.

• EFECTO DE LA TRABAJABILIDAD EN LAS PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

Las propiedades a largo plazo del hormigón endurecido están afectadas por el grado de compactación

El volumen de poros capilares depende sólo de la razón w/c

El volumen de poros de aire atrapado está gobernado por la granulometría de partículas finas y la dosis de agua

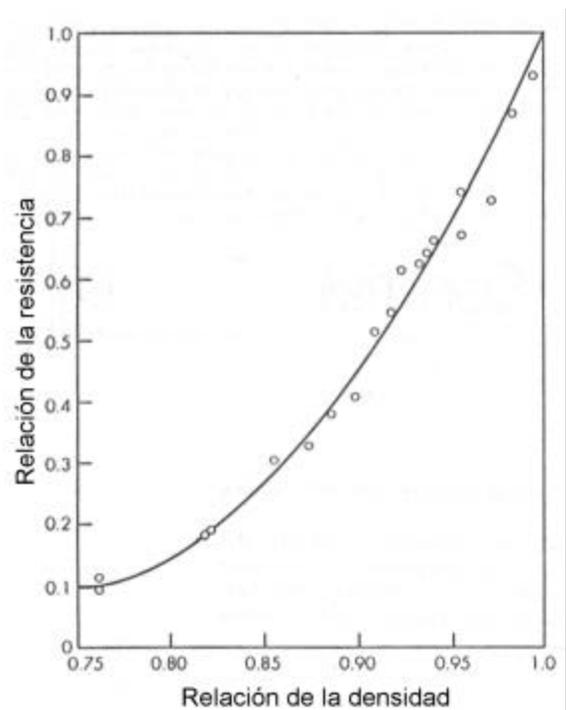


Figura 1. Efecto de la relación de la densidad en la relación de resistencia

• EFECTO DE LA COMPACTACIÓN EN EL VOLUMEN DE HUECOS

Para cada método compactación hay una dosis óptima de agua para minimizar volumen de huecos \Rightarrow máxima densidad

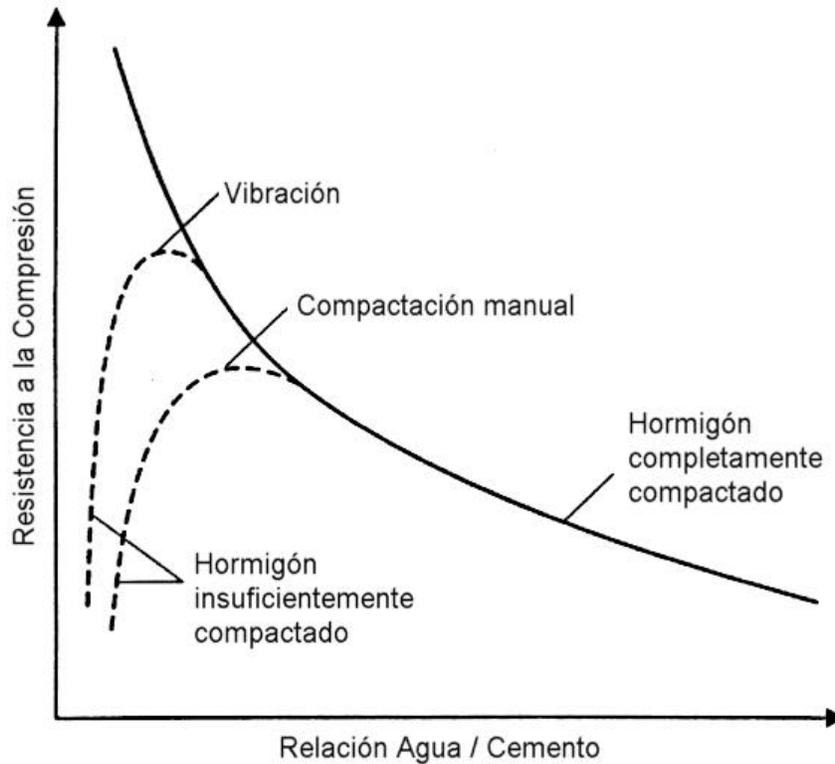


Figura 2. Efectos de la relación agua / cemento y el tipo de vibrado sobre la resistencia del hormigón

CONDICIÓN DE TRABAJABILIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO

• DEFINICIÓN

CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN EN ESTADO PLÁSTICO

Alto frotamiento interno por efecto del tamaño de las diferentes partículas
Baja cohesión por débiles fuerzas físicas de unión

PROPIEDADES FAVORABLES

Acepta desplazamiento y deformaciones con pequeños aportes de energía externa.

ENERGÍA NECESARIA PARA VENCER REACCIONES INTERNAS HORMIGÓN

{ Frotamiento o fricción entre partículas granulares **® FLUIDEZ o DOCILIDAD**
 { Cohesión de la masa (firmeza de forma) **® CONSISTENCIA**

FLUIDEZ + CONSISTENCIA = TRABAJABILIDAD

La trabajabilidad condiciona las propiedades del Hormigón Fresco Empleo en obra (tipo transporte y compactación)

Trabajabilidad	contenido de	
	agua	granos finos
Fluidéz	↗	↘
Consistencia	↘	↗

Figura 3. Influencia del agua y granos finos sobre la trabajabilidad

Definición Estricta de Trabajabilidad (Granville, Collins y Matthews)

CANTIDAD DE TRABAJO INTERNO ÚTIL NECESARIO PARA PRODUCIR
COMPACTACIÓN TOTAL

TRABAJO SUPERFICIAL : vencer fricción entre hormigón y moldes o armadura

TRABAJO INÚTIL : vibrar y sacudir moldes, vibrar hormigón compactado

Trabajabilidad debe ser definida como una **Propiedad Física** del hormigón, sin considerar los requerimientos de un tipo particular de construcción.

- **FACTORES QUE AFECTAN LA TRABAJABILIDAD**

Dosis de agua
Áridos
Granulometría
Tamaño Máximo
Forma del Grano
Textura
Aire Incorporado
Finura del cemento
Aditivos

Factores inherentes

Tiempo
Temperatura del hormigón fresco

Factores externos

➤ *Dosis de Agua, Tamaño Máximo del Árido y Forma del Grano.*

Principal factor porque aumenta lubricación entre partículas.

Dosis de agua depende fundamentalmente de:

Tamaño máximo del árido

Forma de granos (superficie específica)

Tabla 1. Volumen Estimado de Agua Libre de Amasado [litros] (NCh170 Of.85)

Tamaño máximo nominal [mm]	Docilidad según descenso de cono [cm]				
	0 - 2	3 - 5	6 - 9	10 - 15	16
63	135	145	155	165	170
50	145	155	165	175	180
40	150	160	170	180	185
25	170	180	190	200	205
20	175	185	195	205	210
12	185	200	210	220	230
10	190	205	215	230	240

NOTAS:

- La dosis de agua de amasado estimada tiene que ser ajustada en mezclas de prueba para cumplir con la docilidad requerida para la obra. Para esto, tiene que considerarse los aditivos plastificantes si están especificados, la proporción y la forma de los áridos.

- La dosis de agua de amasado debe ser corregida por el agua absorbida por los áridos ya que en la tabla se consideran en condición sss.

- Los aditivos solubles o líquidos se consideran como parte del agua libre o de amasado.

Figura 4. Relación Cono - Agua Libre (NCh170 Of.85)

Tabla 2. Dosis de agua libre aproximada requerida para varios niveles de trabajabilidad (Método Inglés 1988 modificado por DICTUC)

Arido		Dosis de agua libre (kg/m ³) para:				
Tamaño máximo [mm]	Tipo de árido	Asentamiento de cono [cm]	0 - 1	1 - 3	3 - 6	6 - 18
		Vebe [s]	> 12	6 - 12	3 - 6	0 - 3
10	Rondado		150	180	205	225
	Chancado		180	205	230	250
20	Rondado		135 (135)	160 (160)	180 (180)	195 (195)
	Chancado		160 (170)	170 (190)	190 (210)	215 (225)
40	Rondado		115 (115)	140 (140)	160 (160)	175 (175)
	Chancado		140 (155)	160 (175)	180 (190)	195 (205)

NOTAS:

- 1.- En itálicas valores originales propuestos por Método Inglés.
- 2.- Cuando el árido grueso y la arena son de diferente tipo, la dosis de agua libre se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W = \frac{2}{3}W_a + \frac{1}{3}W_g$$

donde W_a = dosis de agua para tipo de árido de la arena
 W_g = dosis de agua para tipo de árido del árido grueso

Figura 5. Relación Cono - Agua Libre (Método Inglés 1988 modificado por DICTUC)

Efecto de la Trabajabilidad en la Desviación Estándar de Hormigones

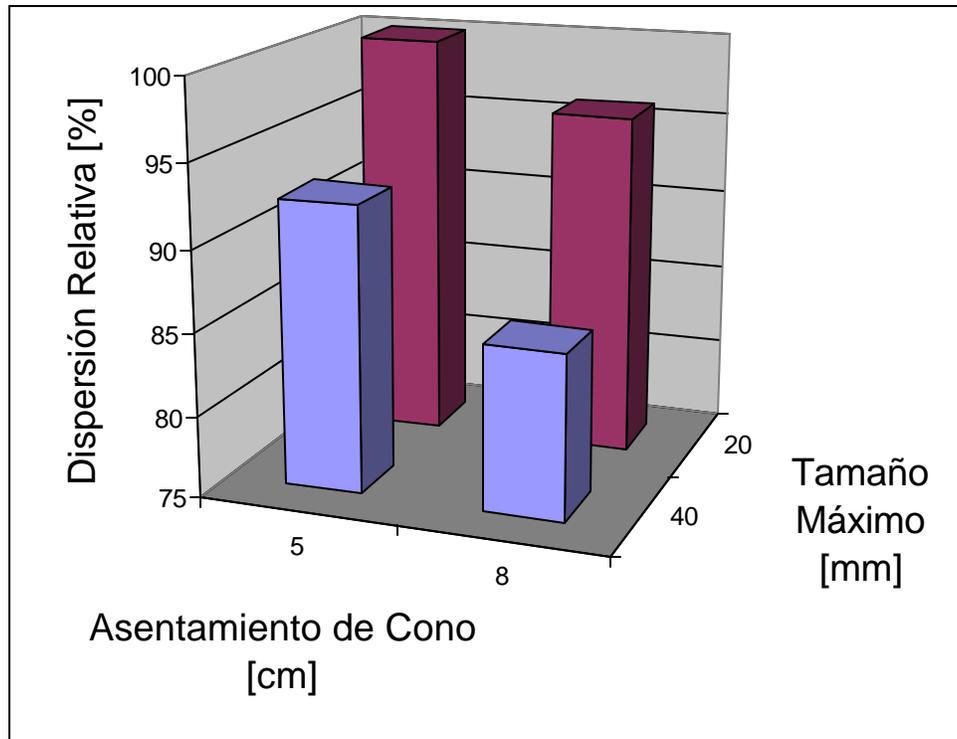


Figura 6. Relación entre el Tamaño Máximo y Asentamiento de Cono con la dispersión relativa.

➤ *Áridos*

Condiciones óptimas para minimizar cantidad de huecos o maximizar densidad sin segregación:

Granulometría o Razón Volumen (Árido Grueso)/(Árido Fino)

A mayor razón AG/AF \Rightarrow Segregación y menor trabajabilidad
(mezcla áspera y de difícil terminación)

A menor razón AG/AF \Rightarrow Mayor trabajabilidad y menor durabilidad

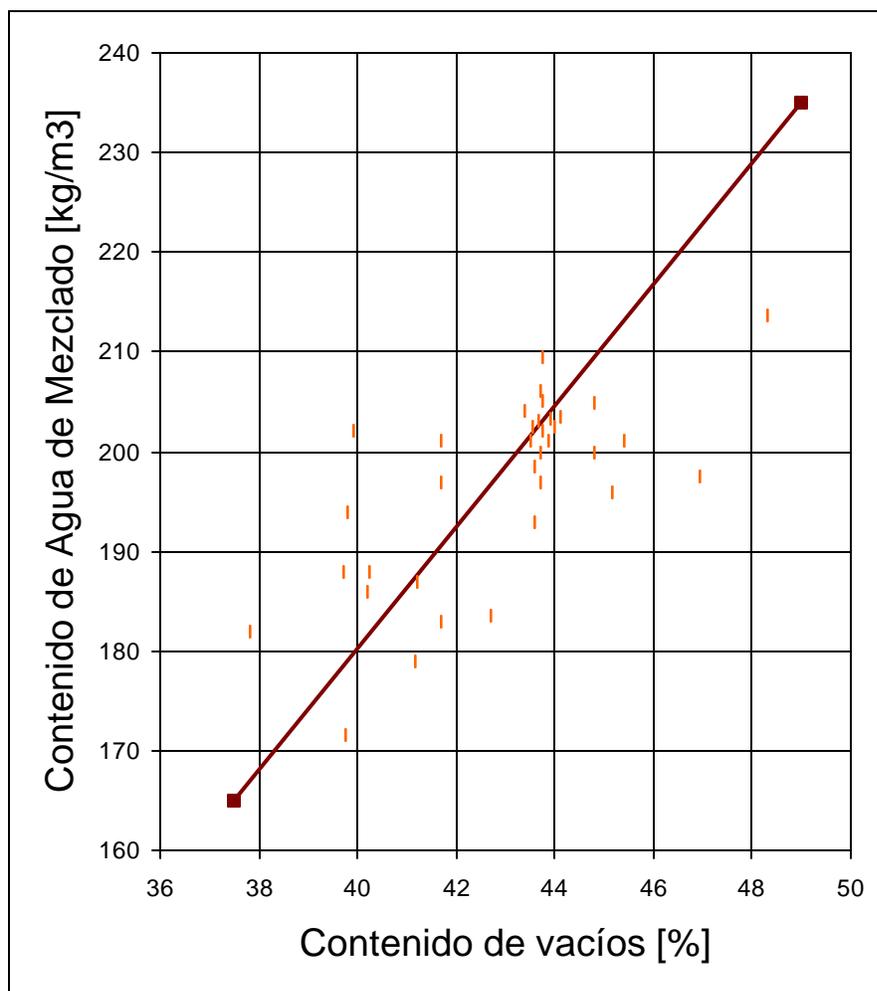


Figura 7. Relación entre el % de huecos y el contenido de agua de mezclado

Forma y Textura

Mayor irregularidad \Rightarrow Forma y Textura más áspera

\Rightarrow Mayor demanda de agua

Árido angular v/s árido redondeado

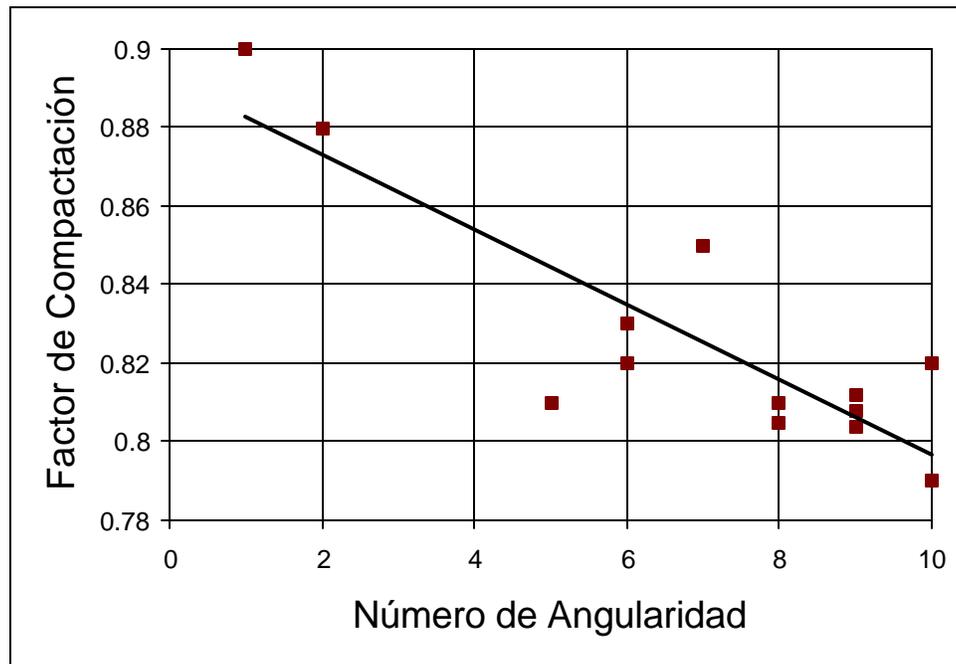


Figura 8. Relación entre el número de angularidad y el factor de compactación

Finura

A mayor finura de partículas \Rightarrow Mayor superficie específica

\Rightarrow Mayor demanda de agua

Porosidad

Parte del agua de amasado necesaria para la lubricación será removida por absorción.

Razón Árido / Cemento

A razón $W/C = cte$, mayor trabajabilidad a menor razón A/C . Cantidad de agua relativa a superficie total de sólidos aumenta.

A mayor razón W/C , menor razón AG/AF (granulometría + fina) para lograr mayor trabajabilidad.

Para razón W/C dada existe una razón AG/AF óptima.

➤ *Finura del Cemento*

A mayor finura cemento mayor demanda de agua.
Influencia menor.

➤ *Aditivos*

Aire atrapado reduce la dosis de agua requerida para trabajabilidad dada.
Aditivos plastificantes y fluidificantes (superplastificantes).

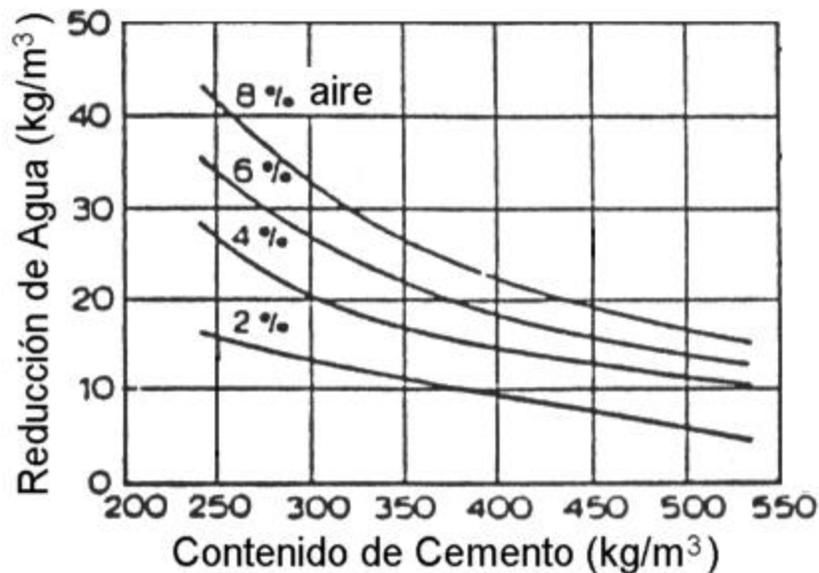


Figura 9. Reducción de la cantidad de Agua de mezclado debido al Aire incorporado.

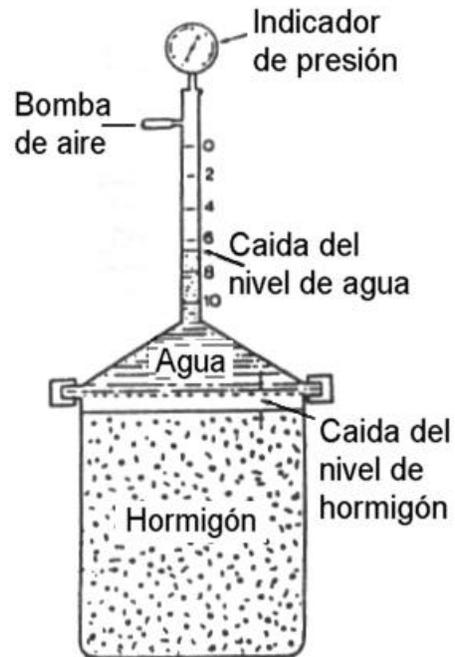


Figura 10. Medidor de aire por presión.

Se puede bajar la dosis de agua y la razón W/C (lo que baja la trabajabilidad), e incorporar aire (lo que la aumenta), para así compensar ambos efectos.

➤ Tiempo

Hormigón fresco se rigidiza con el tiempo porque:

- Parte W amasado es absorbida por el árido
- Parte W amasado se pierde por evaporación
- Parte W amasado se remueve por reacciones químicas iniciales

No confundir rigidización del hormigón fresco con tiempo de fraguado del cemento

Pérdida cono con tiempo depende de:

- Riqueza mezcla
- Tipo de cemento
- Temperatura hormigón
- Trabajabilidad inicial

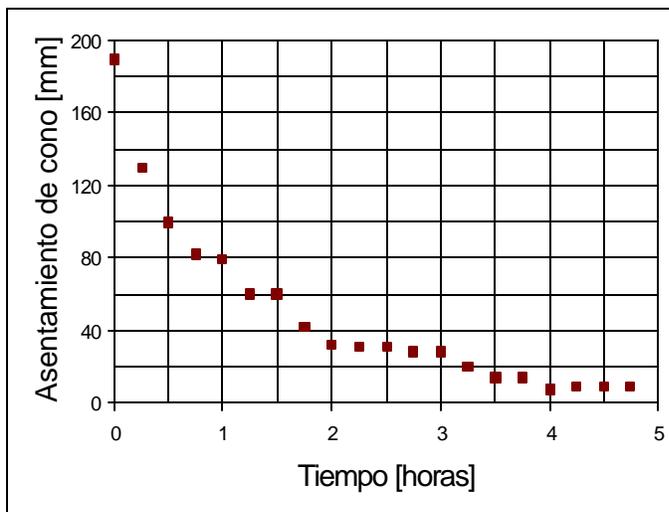


Figura 11. Relación entre el Asentamiento de Cono y el Tiempo desde que se terminó de mezclar para un hormigón W/C = 0,775

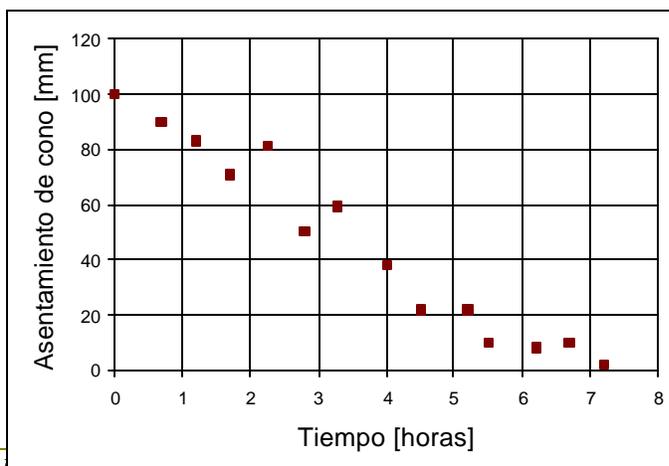


Figura 12. Pérdida de Asentamiento de Cono durante el transporte, siendo el hormigón revuelto a 4 rev / min.

➤ Temperatura

A mayor temperatura, menor trabajabilidad.

A igual trabajabilidad, una menor temperatura permite bajar la razón W/C.

A mayor temperatura, mayor pérdida de cono.

A mayor temperatura, mayor dosis agua para variar trabajabilidad

Recomendable preparar un hormigón más trabajable que lo requerido.

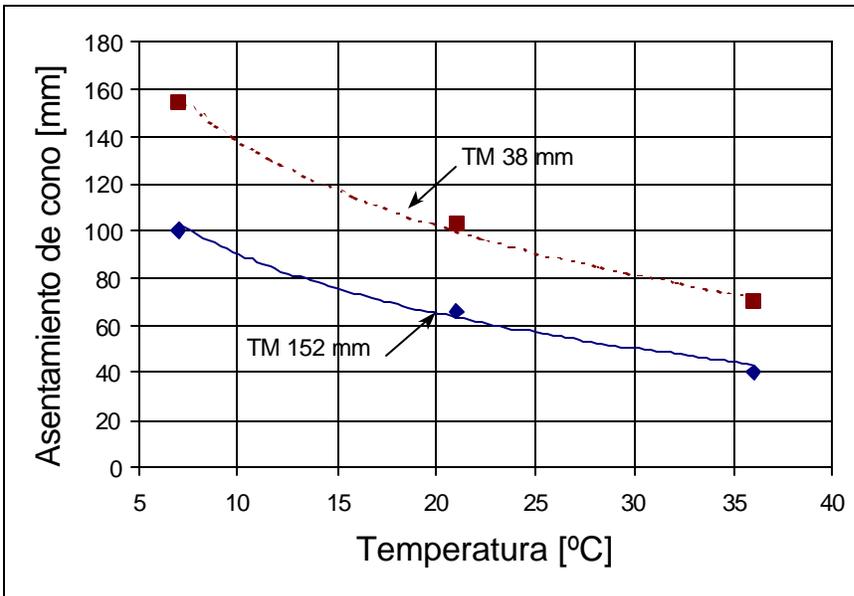


Figura 13. Influencia de la Temperatura en el Agua Requerida para realizar cambios de cono

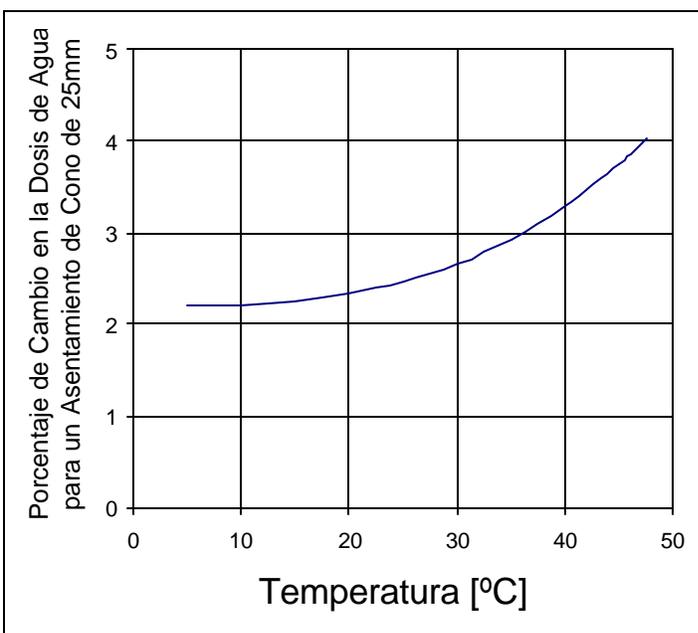


Figura 14. Influencia de la temperatura en el cono de hormigones de distinto tamaño máximo de árido

- **MEDIDAS DE TRABAJABILIDAD**

CUANTITATIVAS EMPÍRICAS

ASENTAMIENTO CONO DE ABRAMS
ENSAYO BOLA KELLY
ENSAYO VeBe
FACTOR DE COMPACTACIÓN
MESA DE FLUJO

CUALITATIVAS

FLUIDEZ
COHESIÓN
COMPACIDAD
ESTABILIDAD
FACILIDAD DE TERMINACIÓN
BOMBEABILIDAD

CUANTITATIVAS FUNDAMENTALES

VISCOSIDAD
UMBRAL DE CIZALLE

• MEDIDAS EMPÍRICAS DE LA TRABAJABILIDAD

Muestreo hormigón fresco: NCh 171 E Of. 75 (> 30 lts)

➤ *Asentamiento de cono de Abrams*

Ensayo	Norma NCh 1019 EOf. 74. Tronco cono (h = 305 mm; ϕ_{base} = 203 mm; ϕ_{sup} = 102 mm) llenado en 3 capas compactadas con 25 golpes de pisón c/u.
Fluidez	Medida del asentamiento en el centro mide umbral de cizalle
Consistencia	Forma de derrumbamiento
Ventajas	Simplicidad
Uso	Laboratorio y control dosis agua hormigón en obra
Rango de Aplicación	2 a 15 cm. De asentamiento no es confiable para hormigones pobres

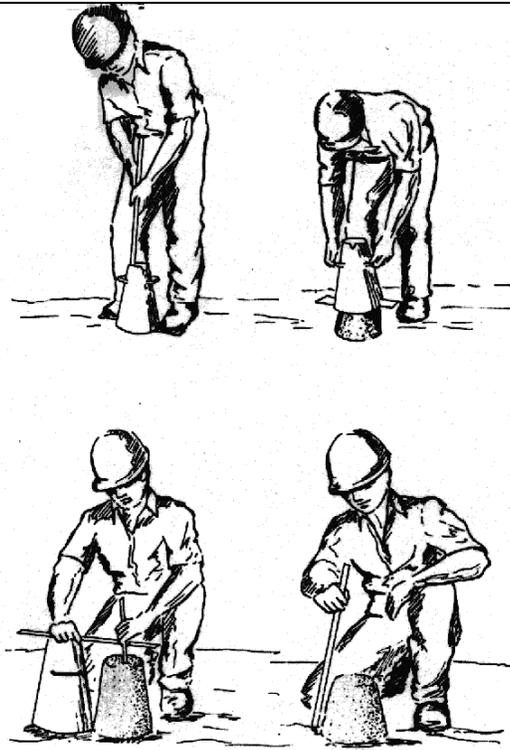


Figura 15. Procedimiento de medición del Asentamiento de Cono de Abrams. (1992, Zabaleta)

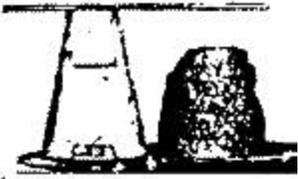
Consistencia		
	Fluidez	Consistencia
Baja		
Alta		

Figura 16. Fluidez y Consistencia.



Figura 17. Medición del Asentamiento de Cono

➤ *Ensayo de Bola Kelly*

Ensayo	ASTM C 360 - 82
Mide	Penetración semiesfera ($\phi = 152 \text{ mm}$) por peso propio (14 kg)
Efectos borde	Profundidad $\geq 20 \text{ cm}$. - lateral $\geq 46 \text{ cm}$.
Ventajas	Rápido y simple. Permite medida en hormigón puesto en obra buena correlación con cono Abrams
Uso	Controlar variaciones del contenido humedad áridos
Rango de Aplicación	id. Asentamiento de cono

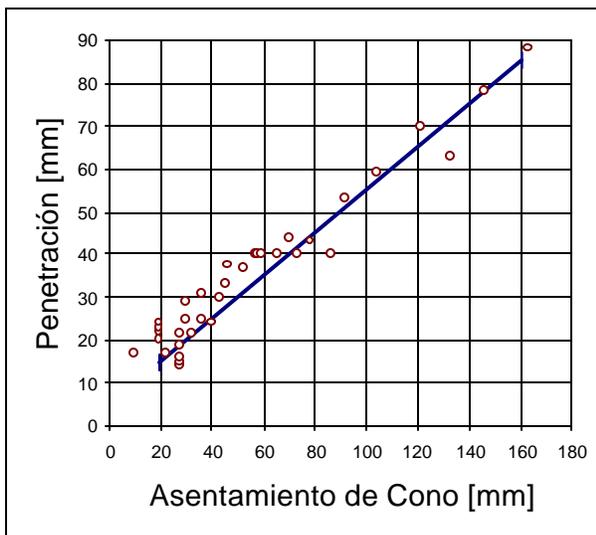


Figura 18. Relación entre la Penetración de la Bola Kelly y el Asentamiento de Cono.

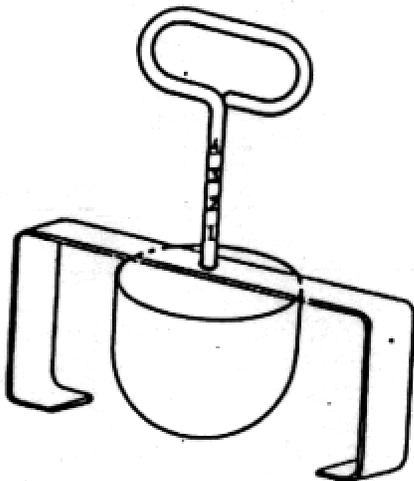


Figura 19. Bola Kelly.

Tabla 3. Relación entre la penetración de la bola Kelly, el asentamiento de cono y el aparato VeBe

Estados del hormigón	FLUIDEZ				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Asentamiento cono	0 – 1 cm	2 – 3 cm	4 – 6 cm	7 – 9 cm	10 – 12 cm
Aparato Ve Be	5 – 10 s	3 – 4 s	1 – 2 s	-	-
Bola Kelly	0.5 cm	1 – 1.5 cm	2 – 3 cm	3 – 5 cm	5 – 6 cm

➤ *Consistómetro Vebe (v. Bahrner, Suecia)*

Ensayo	BS 1881:1983 y ACI 211.3-75 Remoldear por vibración (50 HZ y amplitud $\pm 0,35$ mm) una masa troncocónica de hormigón y transformarlo en forma cilíndrica
Mide	Tiempo necesario para compactación total
Ventajas	Proceso dinámico tratamiento del hormigón similar a terreno
Uso	Laboratorio, por relativa complejidad equipo
Rango de Aplicación	Hormigones secos (cono < 5 cm.) poca sensibilidad en hormigones fluidos

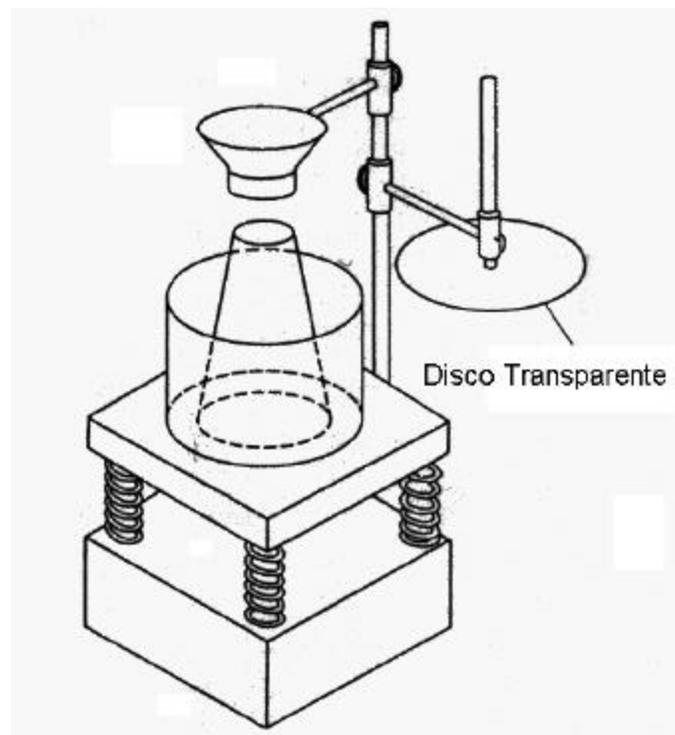


Figura 20. Consistómetro VeBe.

➤ *Factor de Compactación (Granville)*

Ensayo	BS 1881:1983 y ACI 211.3-75 Compactación por caída en recipiente cilíndrico.
Mide	Grado de compactación con cantidad energía estándar (razón de densidad) Factor de Compactación = $\frac{\text{(densidad hormigón compactado por caída)}}{\text{(densidad máxima del hormigón)}} \leq 1$
Ventajas	Más sensible para hormigones secos
Uso	Laboratorio, por relativa complejidad equipo
Rango de Aplicación	Hormigones secos (cono < 5 cm.) No depende riqueza mezcla. Mezclas con igual fc no requieren necesariamente igual energía para compactación

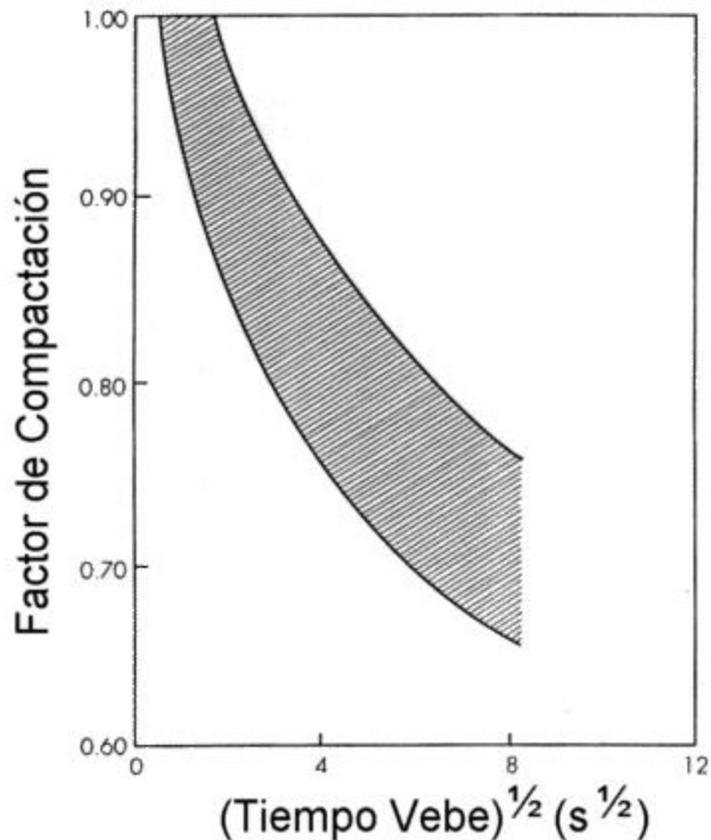
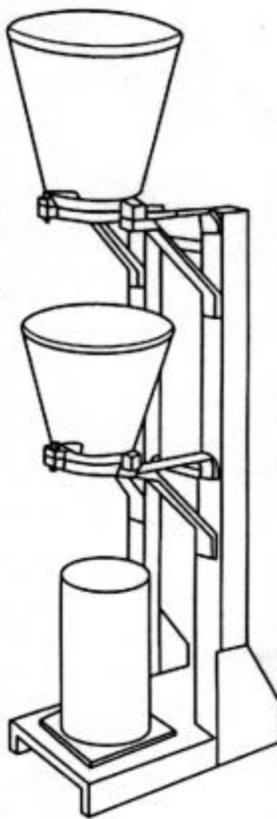


Figura 21. Equipo para medir el Factor de Compactación y Relación entre el Factor de Compactación y el Tiempo Vebe

➤ *Ensayo Mesa Flujo (Flow Table Test: DIN y BS)*

Ensayo	DIN 1048 y BS 1881: 1984 Se levanta a 4 cm. Y deja caer 15 veces una plataforma articulada de 70x70 cm. (16 kg) que contiene un troncocono de 20 cm alto, ϕ_{base} 20 cm y ϕ_{sup} 13 cm (similar Abrams)
Mide	Mide el desparramamiento del hormigón y forma de disgregarse DIN : $Desparramamiento = \frac{D-20}{20} \times 100(\%)$ BS : $Flujo = \frac{d-10}{10} \times 100(\%)$ d = diámetro medio entre mayor y menor
Ventajas	Refleja cohesión de la mezcla
Rango de Aplicación	Hormigones fluidos, normal: 80 a 120 % Trabajabilidad media : 40 cm (100%) Trabajabilidad alta : 50 cm (150%)

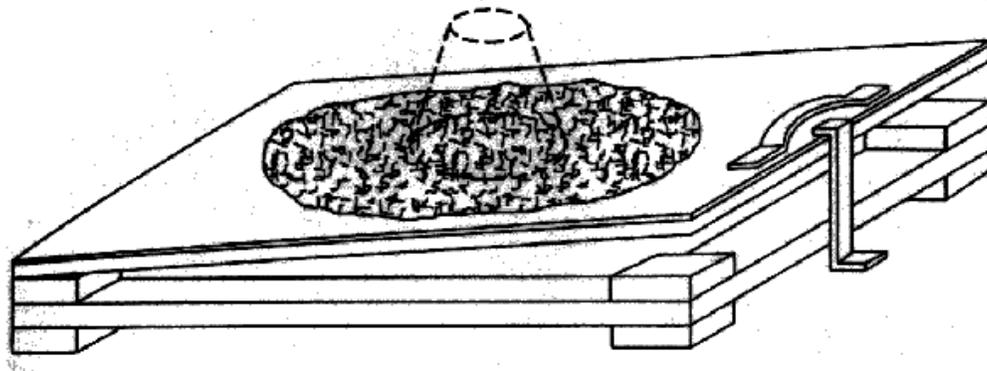


Figura 22. Mesa de Flujo.

➤ *Factor de Compactación Din (Tarro Walz)*

Ensayo	DIN 1048 Paralelepípedo recto de 20x20 cm. Sección y 40 cm altura
Mide	Mide coeficiente de trabajabilidad por asentamiento hasta compactación total (recíproco factor compactación) $k = \frac{\text{Altura}_{\text{Inicial}}}{\text{Altura}_{\text{Final}}} = \frac{40}{40 - S(\text{cm})}$
Ventajas	Disminuye factor humano
Uso	Laboratorio, por relativa complejidad equipo
Rango de Aplicación	Hormigones secos (cono < 5 cm.)

Valores de K	Rango
1,45 a 1,26	K1 ; Duro
1,25 a 1,11	K2 ; Plástico
1,10 a 1,04	K3 ; Blando
1,04	K4 ; Fluido

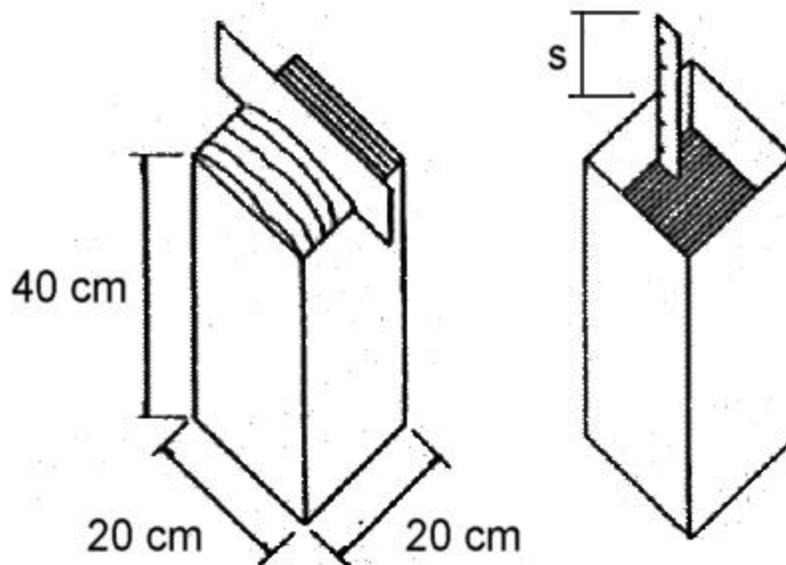


Figura 23. Empleo tarro Walz.

➤ *Mesa Powers (Remoulding Test)*

Ensayo	Se mide el esfuerzo necesario (n° de golpes) para cambiar de forma a una muestra de hormigón. Se acciona una manivela de caída (6,3 mm. de amplitud), aplicando 1 caída por segundo.
Mide	Compacidad y moldeado
Rango de Aplicación	id. Vebe Normal: 30 a 50 golpes > 50 golpes: gasto excesivo de energía para máxima compactación

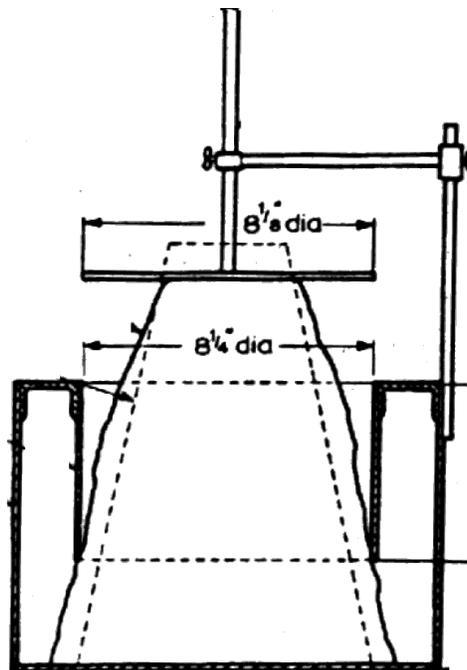


Figura 24. Mesa Powers.

➤ *Ensayo del cono invertido*

Ensayo	Tronco cono, cubo de 1 ft ³ y un vibrador interno con una cabeza de 1" a 1 ¼". El cono invertido se llena con hgón. sin compactar, se enrasa. El vibrador prendido se inserta en el centro del cono, permitiendo la caída del hormigón al cubo. El vibrador se coloca verticalmente su final casi descansando sobre el fondo del cubo.
Mide	El tiempo desde la inmersión inicial del vibrador hasta cuando el cono esté vacío = tiempo de ensayo
Ventajas	Toma en cuenta el aumento del efecto de la movilidad que factores como arenas gruesas, cemento y agua tienen sobre la mezcla

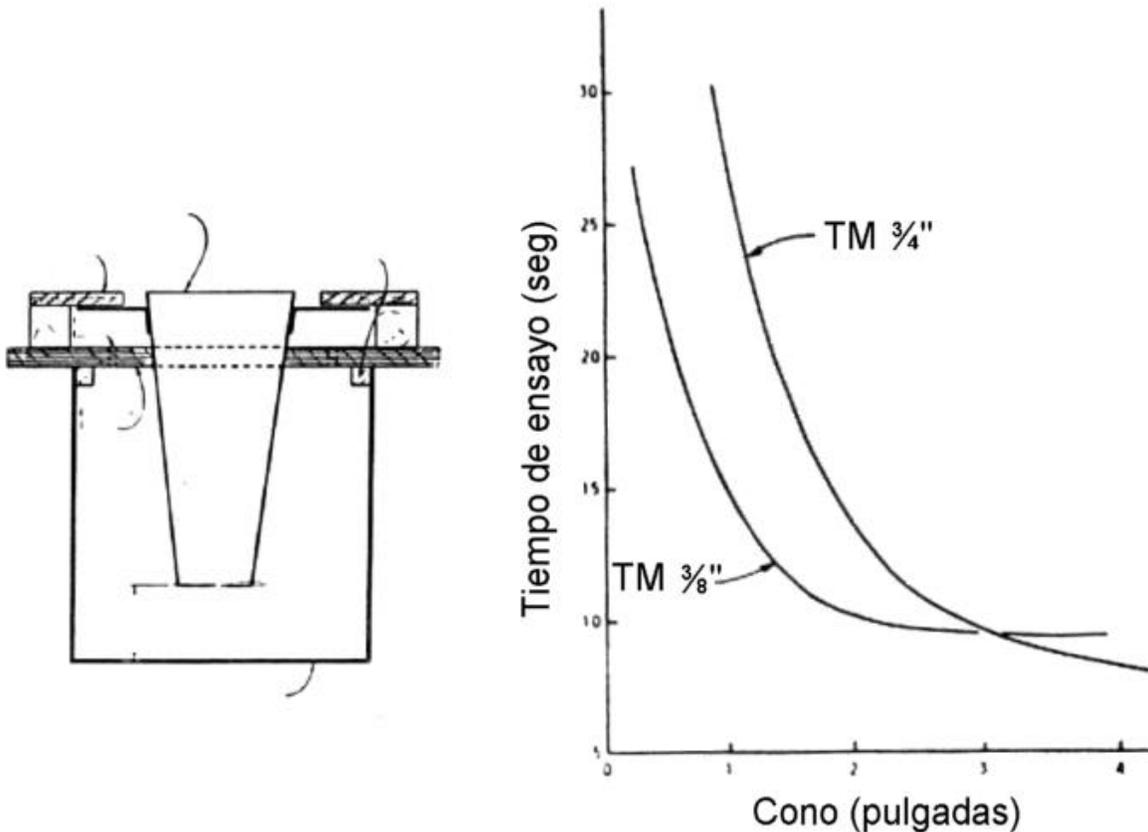


Figura 25. Equipo del Cono Invertido y Resultados del test de cono invertido.

➤ *Medición de la Trabajabilidad en Terreno Usando Betonera*

Ensayo	Se mide el amperaje consumido por la máquina para un número de revoluciones constante: (Energía Watt = Volts (ctes) * Amperaje)
Ventajas	Operador controla: Trabajabilidad del hormigón Tiempo máximo de revoltura

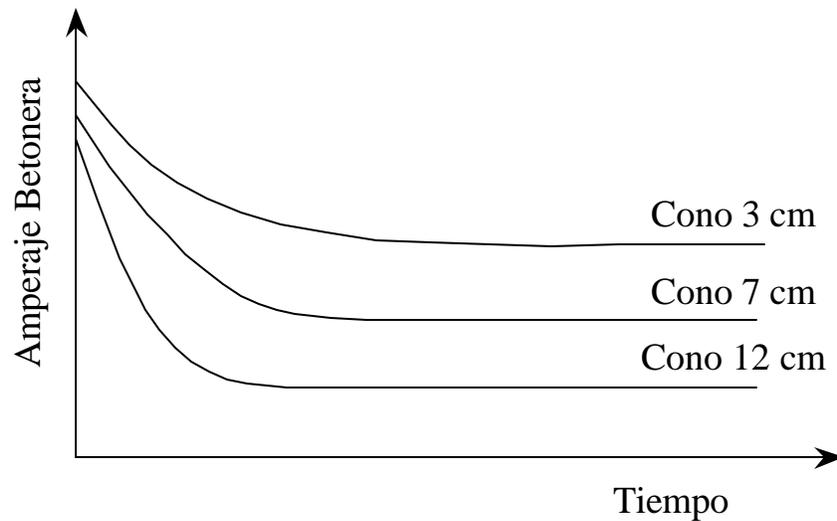


Figura 26. Variación del Amperaje de la Betonera en el Tiempo de Revoltura para diferentes Asentamientos de Cono.

➤ *Relación entre los métodos de ensayo de trabajabilidad*

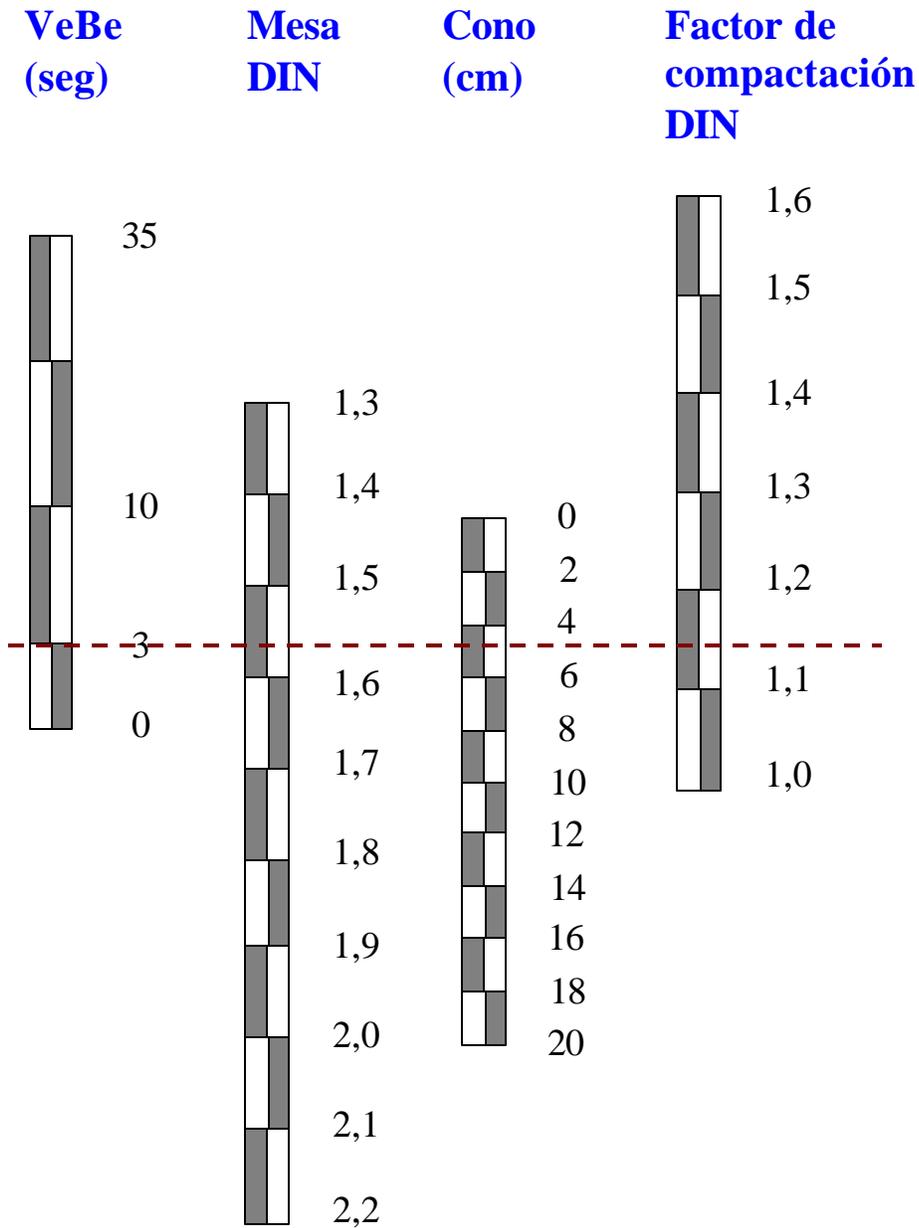


Figura 27. Relación entre métodos de ensayo de consistencia.

Figura 28. Relación entre la Penetración de la Bola Kelly y el Asentamiento de Cono.

Figura 29. Relación entre el Factor de Compactación y el Tiempo Vebe.

Tabla 4. Valores de fluidez correspondientes a ensayos de trabajabilidad. (1992, Zabaleta)

Estados del hormigón	FLUIDEZ				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Asentamiento cono	0 – 1 cm	2 – 3 cm	4 – 6 cm	7 – 9 cm	10 – 12 cm
Aparato Ve Be	5 – 10 s	3 – 4 s	1 – 2 s	-	-
Bola Kelly	0.5 cm	1 – 1.5 cm	2 – 3 cm	3 – 5 cm	5 – 6 cm

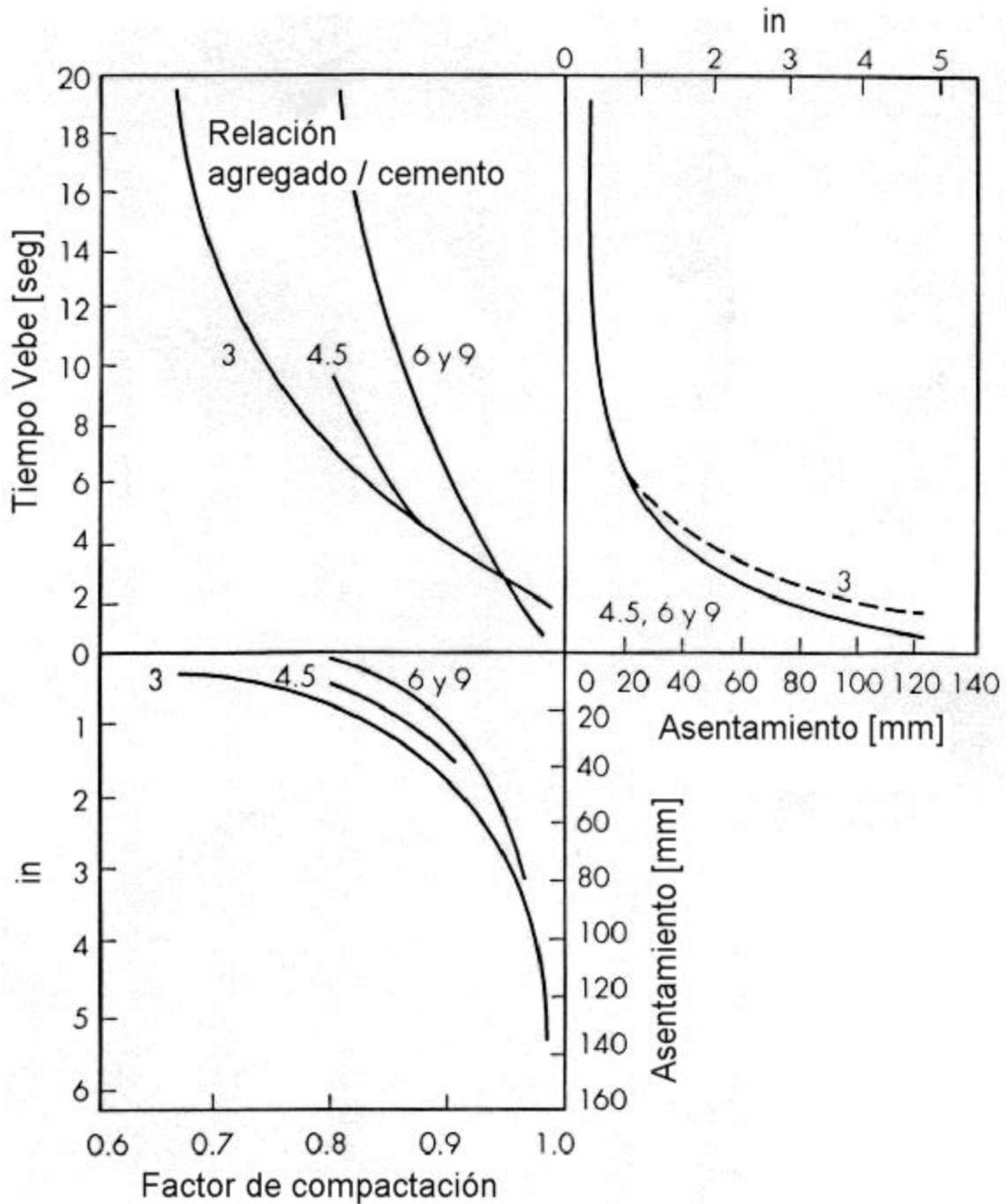


Figura 30. Patrón general de relaciones ente ensayos de trabajabilidad para mezclas con relaciones de Agregado/Cemento variables. (1998, Neville & Brooks)

• REOLOGÍA DEL HORMIGÓN FRESCO

“Es la ciencia que estudia las deformaciones y flujos de la materia”

MATERIAL SÓLIDO HOOKEANO @ COMPORTAMIENTO ELÁSTICO

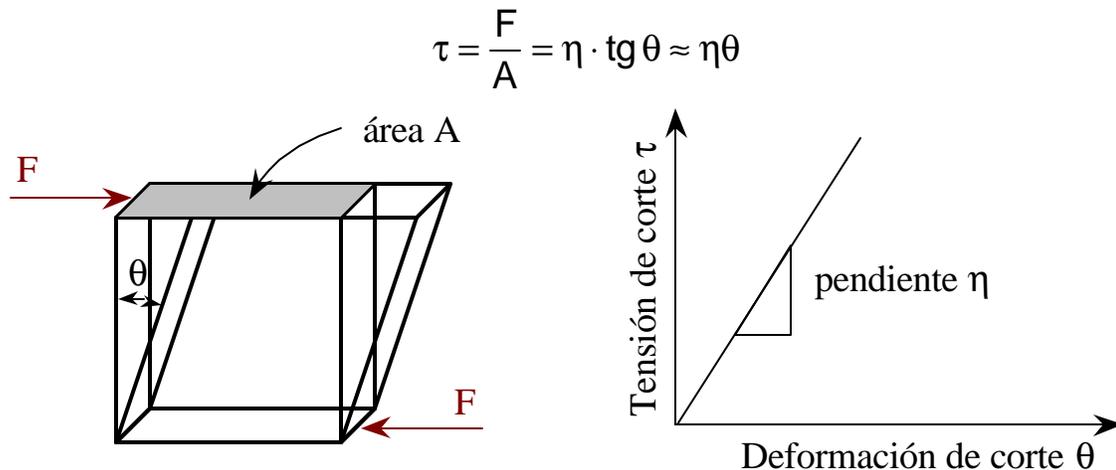


Figura 31. Ley de Hooke para un material sometido a corte. (Tattersall, 1979 - 1980)

COMPORTAMIENTO NEWTONIANO

Líquidos puros, soluciones simples, suspensiones diluídas.

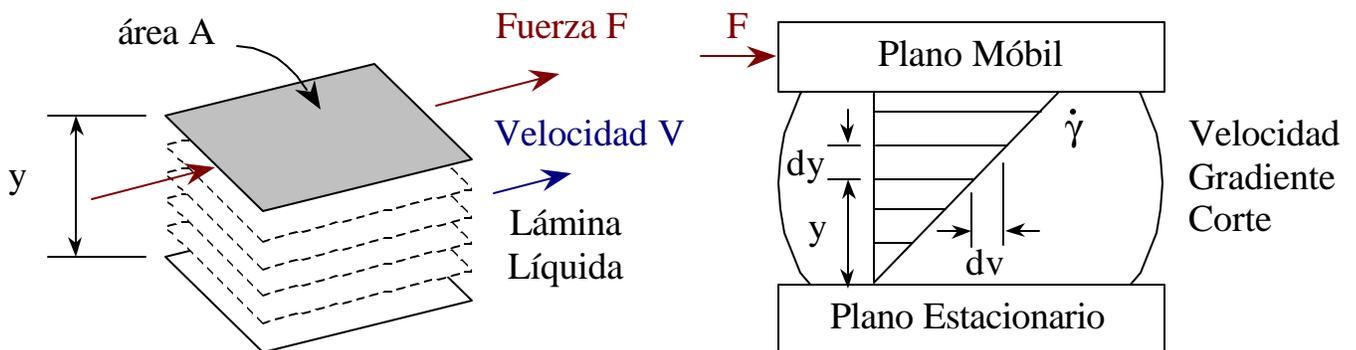


Figura 32. Ley de Newton para un flujo viscoso. (Tattersall, 1979 - 1980) y Modelo de flujo Newtoniano.

Tensión Cortante : $\gamma = \frac{F}{A}$ [N/m²]

Gradiente velocidad entre planos : $D = \frac{dv}{dy}$ [1/s]

Ley de Newton Flujo Viscoso : $\tau = \eta \frac{dv}{dy}$
 η : coeficiente de viscosidad [N*s/m² = poise]

Velocidad de deformación cortante : $\gamma = \frac{dx}{dy}$
 $D = \frac{dv}{dy} = \frac{\partial x}{\partial t \cdot \partial y} = \frac{\partial \gamma}{\partial t} = \dot{\gamma}$
 $\Rightarrow \tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$

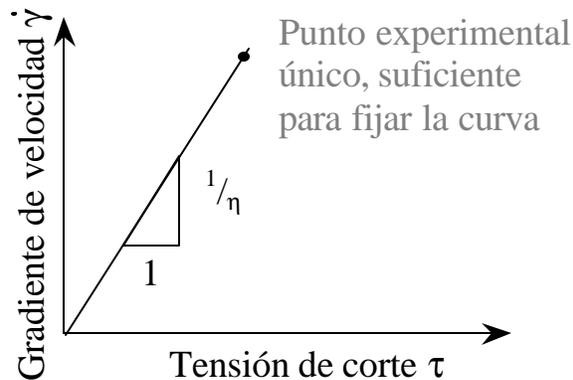


Figura 33. Relación τ y $\dot{\gamma}$

➤ *Estudio Reológico del Hormigón Fresco*

Hormigón Fresco : Suspensión de un sólido en un líquido
 Existen fuerzas entre partículas

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \dot{\gamma}$$

τ_0 : punto crítico o umbral de cizalle (mínima tensión cortante para iniciar desplazamiento).

μ : viscosidad plástica.

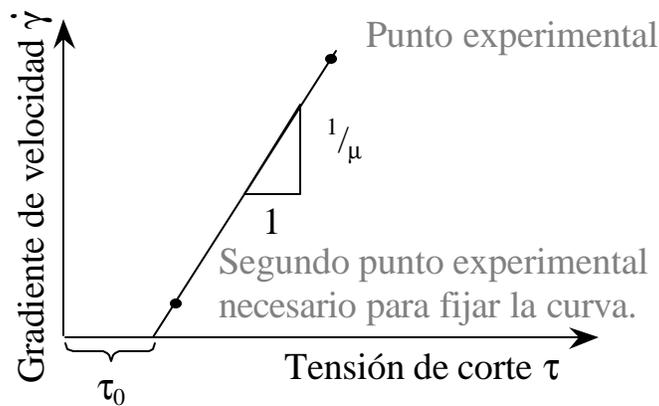


Figura 34. Modelo Bingham (Tattersall, 1979 – 1980).

➤ *Relación Modelo Reológico con Asentamiento Cono de Abrams*

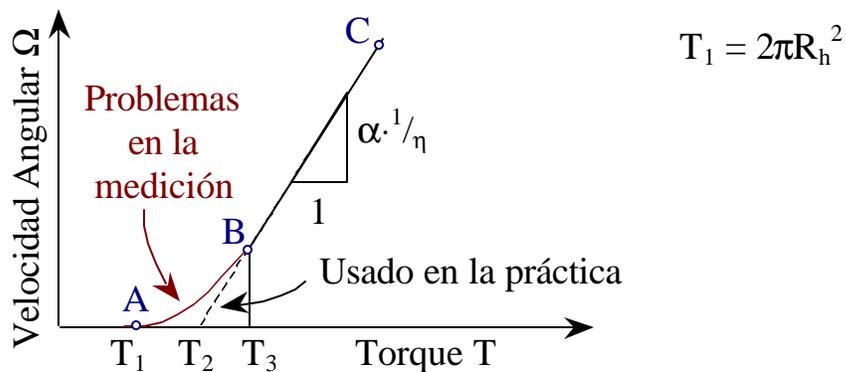


Figura 35. Relación real entre el torque y la velocidad angular

Medición de facilidad de movimiento de los granos material versus Energía necesaria.

$$\text{Torque } T = \frac{(P - P_0)}{N} = \frac{\text{Potencia eléctrica (lleno - vacío)}}{\text{Velocidad eje [rev/seg]}}$$

Energía [Watt = Volt (cte) × Amperaje]

Energía proporcional al torque.

Revoluciones proporcional al gradiente de velocidad.

Tattersal (1976) : “Hormigón fresco se aproxima al modelo Bingham porque la trabajabilidad puede describirse por dos constantes o propiedades”

El asentamiento del cono se relaciona sólo con el punto g (velocidad nula) por ser un ensayo estático.

Relación:

$$S^{-N} = A \times g$$

$$A = 0,007$$

$$N = 0,467$$

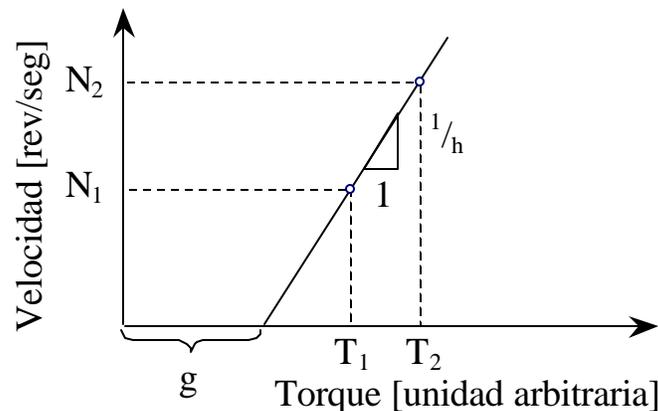


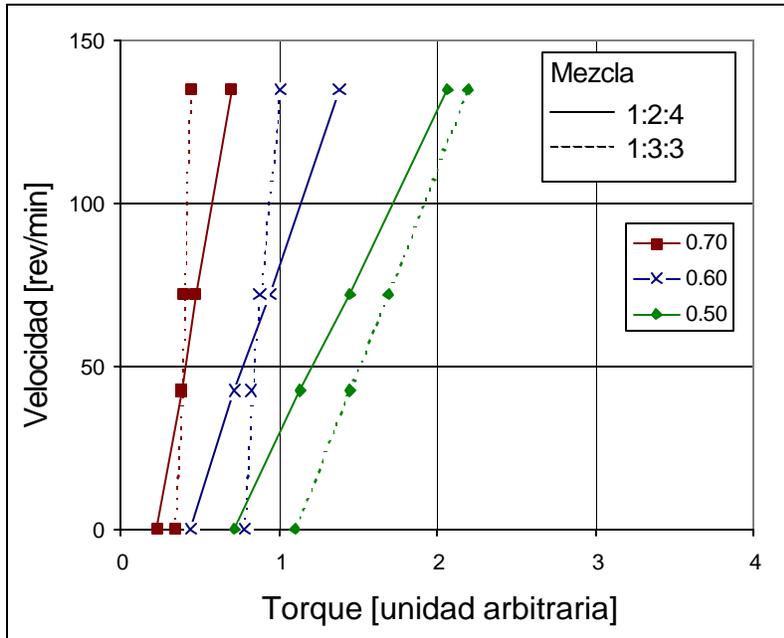
Figura 36. Trabajabilidad del hormigón fresco, según Tattersal (1979 - 1980)

$$T = g + h \times N$$

g, h : constantes determinadas midiendo la potencia requerida a 2 velocidades distintas.

➤ *Aplicación a la Trabajabilidad del Hormigón Fresco*

Curvas de Bingham para Hormigón Fresco.



Curvas es cortan.

Figura 37. Curva Bingham para hormigón fresco: Efecto de cambiar la razón árido grueso/árido fino (Tattersall, 1976).

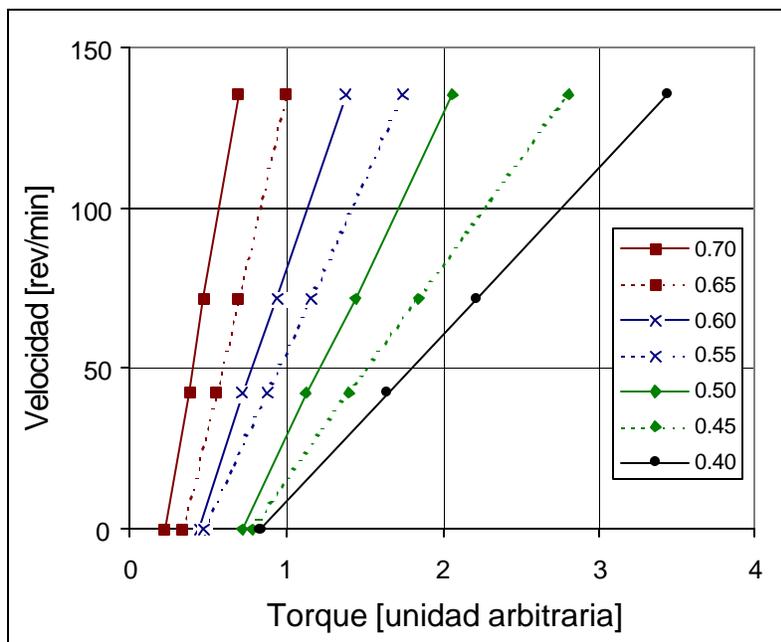


Figura 38. Curva Bingham para hormigón fresco: Efecto de cambiar la razón agua /cemento para una mezcla 1:2:4.

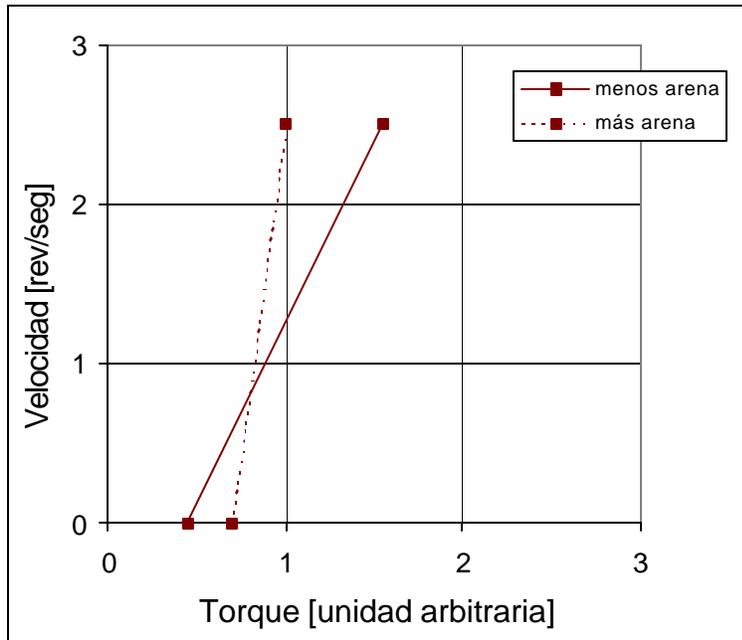


Figura 39. Curva de Bingham para hormigón fresco: Efecto de la cantidad de arena.

Casos uso sólo un o comparar hormigones

Posible controlar dosis de agua con sólo un ensayo o propiedad (curvas no se cortan)

Conocemos la energía aplicada en el terreno y comparamos a igual nivel

Revoluciones aparato → Energía (Watts) o Amperaje para conseguir las (Betонера)

➤ *Viscosímetro Coaxial*

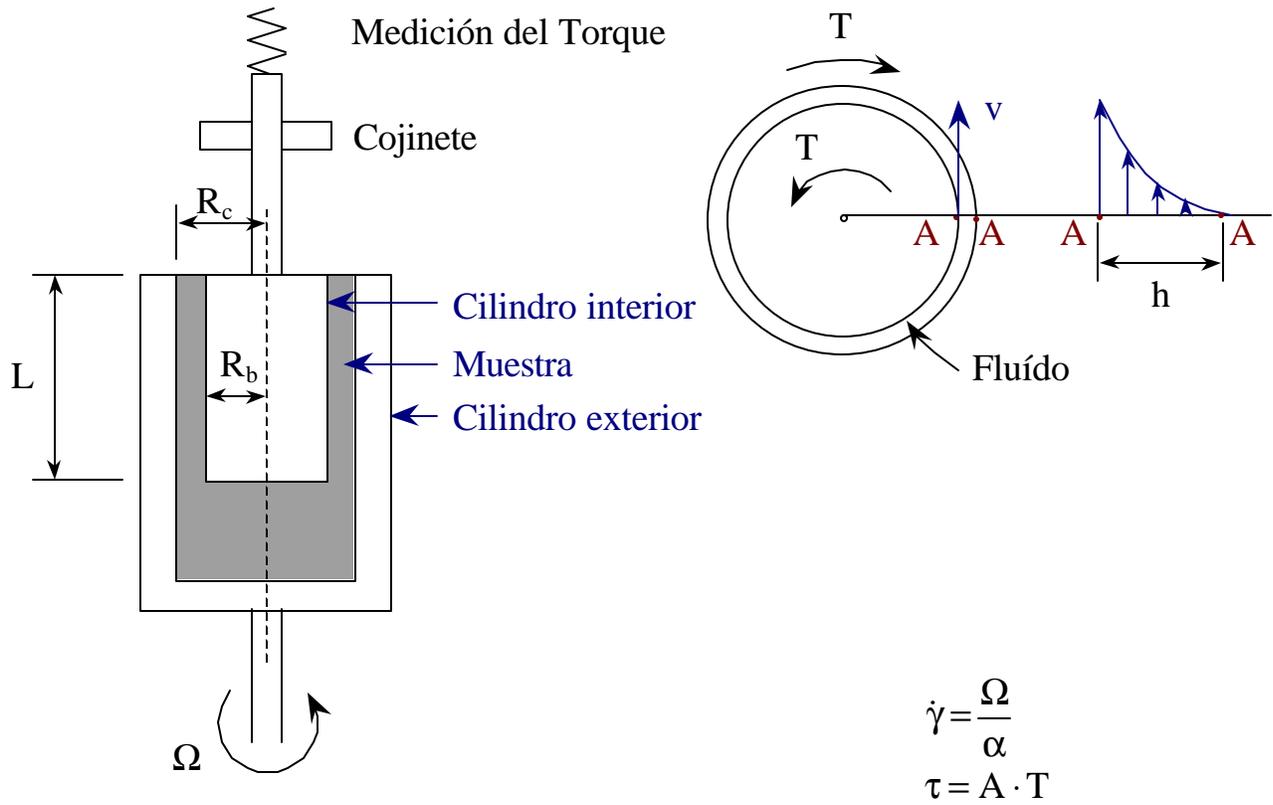


Figura 40. Los principios del viscosímetro coaxial.

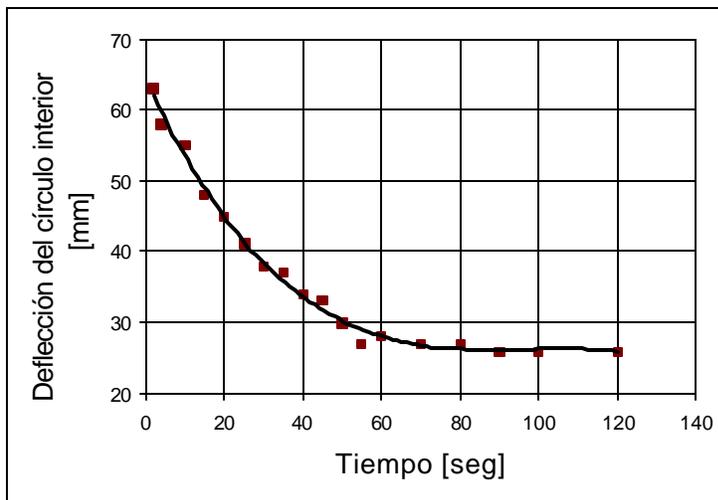


Figura 41. Curva para una razón W/C 0,30 a 386 rev/min.

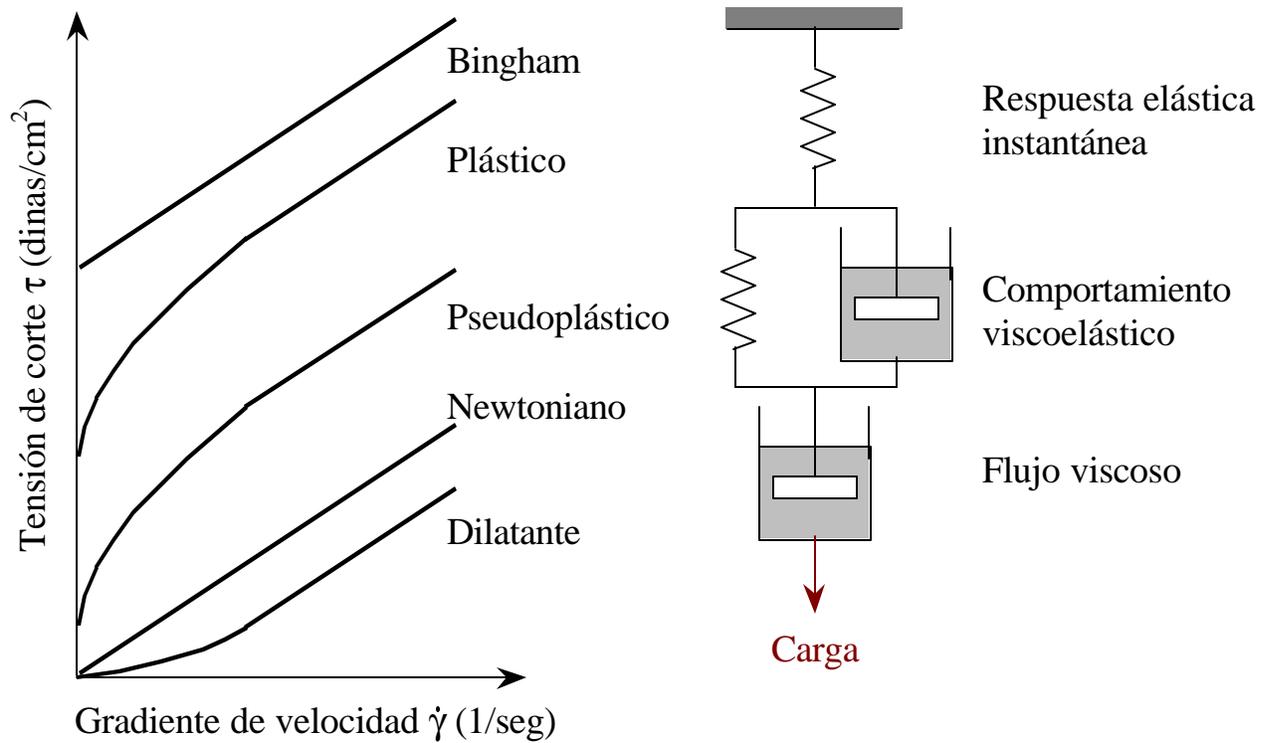


Figura 42. Tipos de Comportamientos viscoelásticos.

PROCESOS DEL HORMIGÓN FRESCO DURANTE LA CONSTRUCCIÓN

SEGREGACIÓN

EXUDACIÓN

VARIACIONES DE VOLUMEN

ASENTAMIENTO PLÁSTICO

RETRACCIÓN PLÁSTICA

FALSO FRAGUADO

• SEGREGACIÓN

Definición

Separación de los componentes del hormigón ya amasado

Origen

Diferencias de tamaño y pesos específicos de las partículas componentes del hormigón

Formas de Segregación

Separación del árido grueso (mezclas muy secas: falta de agua)

Separación de la pasta de cemento (mezclas muy húmedas: exceso de agua)



Medición

Difícil determinación cuantitativa

Fácil detección en terreno

Consecuencias

La mezcla pierde uniformidad en cuanto a la distribución de las partículas

Produce serias dificultades en colocación y compactación

Construcciones resultan defectuosas: poros y nidos

Procedimientos para Evitarla

Emplear dosis agua equilibrada (depende del hormigón)

Emplear áridos granulometría adecuada

Dosificar apropiadamente razón árido grueso/árido fino

Usar dosis cemento adecuada

Aditivo incorporador de aire reduce segregación

Ejecutar correctamente los procesos:

Transporte: cuidar manejo de áridos

evitar transporte hormigón con cambios de dirección

Colocación: evitar caída hormigón de gran altura

evitar desplazar hormigón con vibrador

evitar descarga contra obstáculos

Compactación: evitar vibrado en exceso

Dosificación

Construcción



Figura 43. Segregación en la base del muro (ENACO Los Domínicos)

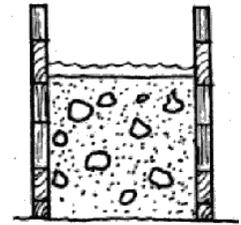
• EXUDACIÓN DEL AGUA DE AMASADO

Definición

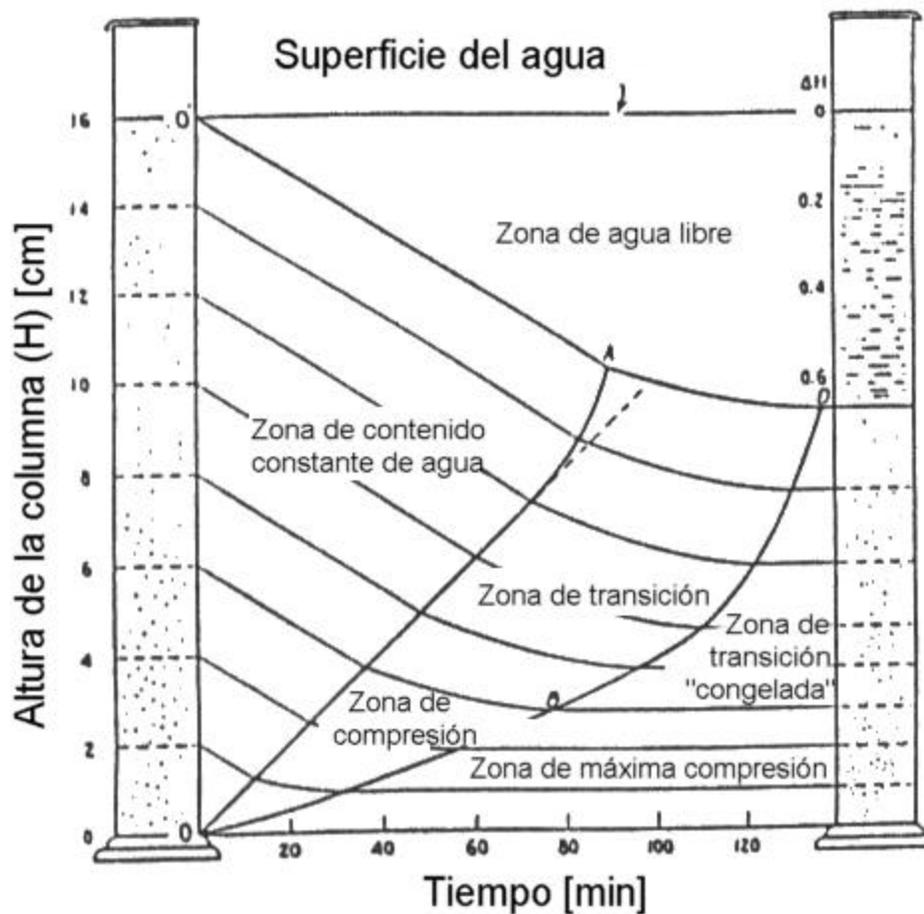
Tendencia del agua a ascender a la superficie del hormigón ya colocado y compactado, produciendo una decantación de los materiales sólidos.

Origen

Hormigón constituido por materiales distinto peso específico.



Exudación



Exudación se Detiene Cuando

Las partículas sólidas se tocan y no pueden decantar más.
El cemento se rigidiza y previene mayores movimientos.

Medición (Según el ensayo ASTM c 232-71)

Capacidad de exudación:

Tiene que ver con las grietas plásticas cuando el hormigón no puede decantar.

Cambia proporcionalmente a la sección.

Velocidad de exudación:

Es constante para un hormigón dado.

Las grietas se producen por la velocidad de secado: Retracción plástica.

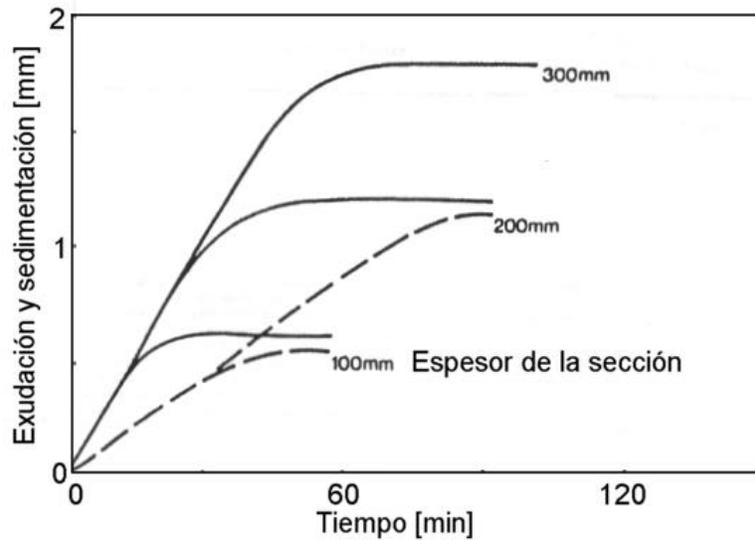


Figura 44. Exudación típica del hormigón.

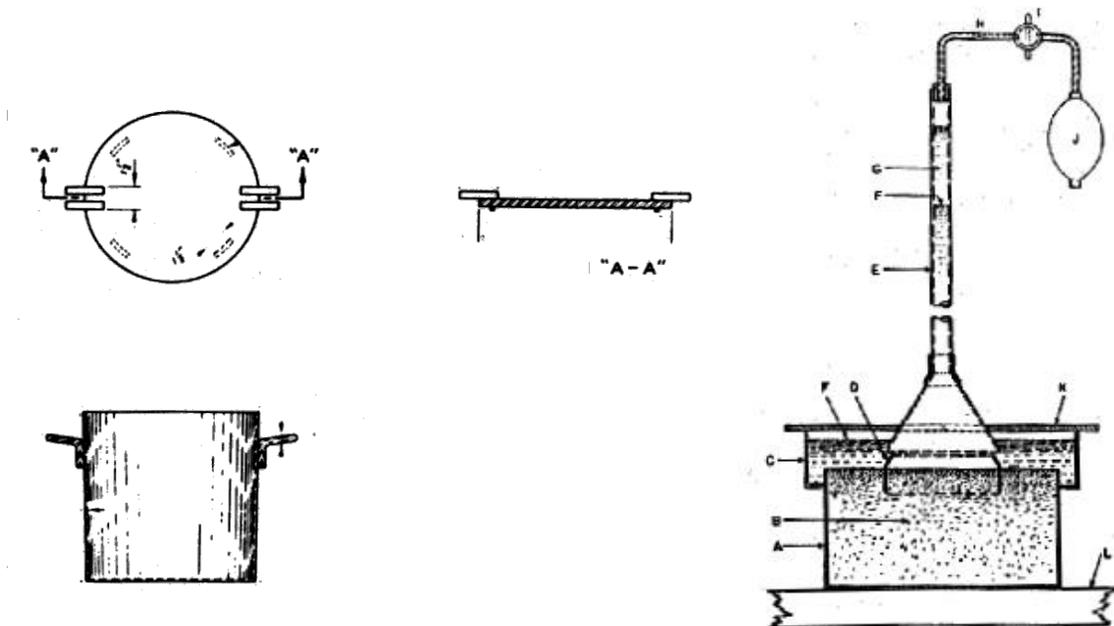


Figura 45. Equipos????.

Fenómenos (Internos y Externos) que Producen

Película superficial con alto contenido de agua y sedimentos finos (mm @ 2 a 3 cm)

Consecuencias

Mayor razón w/c \Rightarrow menor resistencia

Capa superior mas porosa, relativamente permeable

Capa propensa al desgaste, polvorienta, mala adherencia juntas hormigonado

Aumenta riesgo de da,os por congelamiento

Permite acabado superficial (platachado)

Casos en que debe considerarse:

Hormigones sometidos a desgaste superficial

Hormigones utilizados como relleno bajo elementos con fondo horizontal (reparaciones groutt bajo placas fundación)

Juntas de hormigonado: tratamiento para eliminarla

Formación de canales capilares ascendentes

Consecuencias

Aumenta permeabilidad del hormigón

Aumenta riesgo de daños por congelamiento

Casos en que debe considerarse

Hormigones impermeables (ej. Obras hidráulicas)

Fundaciones en terrenos húmedos

Exudación interna del hormigón

Consecuencias

Formación de poros bajo árido grueso y armaduras por acumulación agua ascendente.

Reducción adherencia.

Reducción impermeabilidad en plano horizontal: si existe armadura que impide el paso del agua o la exudación, ésta queda topando a la armadura y se produce un plano de falla horizontal.

Casos en que debe considerarse

Igual caso anterior

Principales Factores Prácticos que Afectan la Exudación

Granulometría del hormigón (áridos + cemento)
Consistencia del hormigón fresco (mezclas ásperas no cohesivas exudan más)

Procedimientos para Atenuarla

Emplear bajas dosis de agua (necesaria)
Usar menor razón w/c
Exudación depende de las propiedades del cemento y disminuye con:
 Alto contenido de álcalis y C₃A
 Mayor finura
 Mayor dosis de cemento
Utilizar proporción adecuada de granos finos < 150 μ
Emplear áridos de granul. adecuada y proporción grava/arena favorable (≈ 1,9) (cantidad arena cercana al contenido óptimo de huecos grava)
 Aumentar dosis y finura arena - usar arena rodada
Usar aditivos incorporadores de aire (reducen velocidad y capacidad exudación)
 Aditivos retardadores aumentan capacidad de exudación
 Adición de puzolana, polvo de aluminio y cloruro de calcio disminuye exudación (cuidar otros efectos adversos)
 Aumentar tiempo de amasado (facilita adecuado humedecimiento y retención del agua en los sólidos)
 Demorar operaciones de terminación
 Colocar hormigón en capas delgadas
 A mayor temperatura mayor velocidad de exudación pero igual capacidad de exudación total
 A mayor velocidad viento mayor velocidad y capacidad de exudación
 En caso de hormigones de relleno, agregar aditivo expansor (polvo de aluminio en dosis 2,5 a 3 gramos por saco cemento (42,5 kg.))

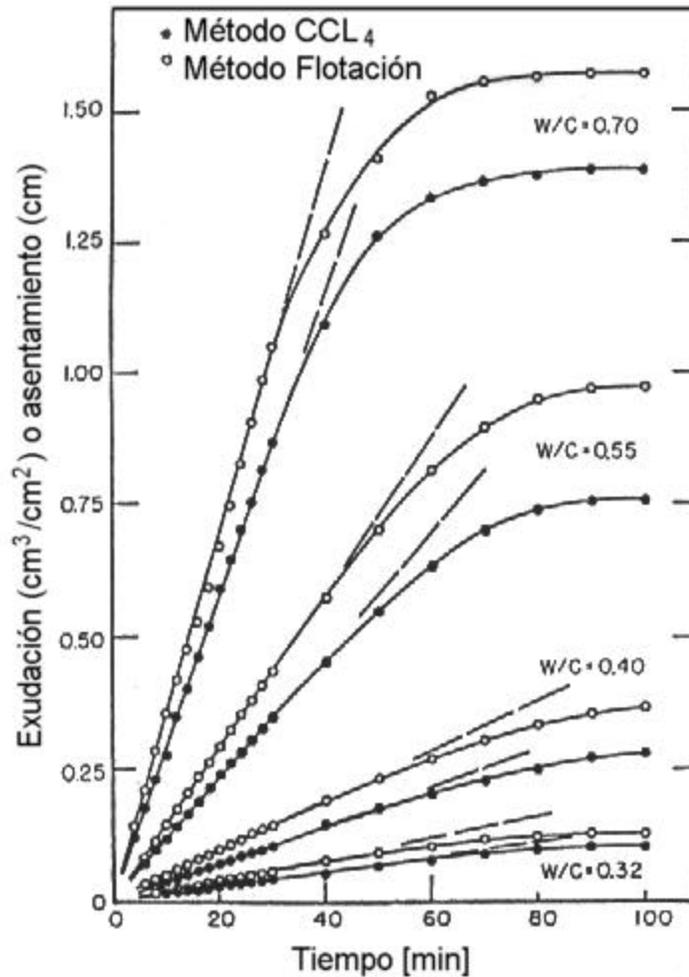


Figura 46. Exudación individual y curvas de asentamiento para pastas puras con cemento C y varias razones W/C.

• VARIACIONES DE VOLUMEN DEL HORMIGÓN FRESCO

Son fenómenos asociados con la exudación.

Las variaciones de volumen pueden producir grietas a 1 a 6 horas después del hormigonado.

• ASENTAMIENTO PLÁSTICO

Definición

Acortamiento vertical hormigón amasado y compactado (hasta 1%)

Origen

Sedimentación de materiales sólidos por efecto de la fuerza de gravedad

Principal Factor

Capacidad de exudación

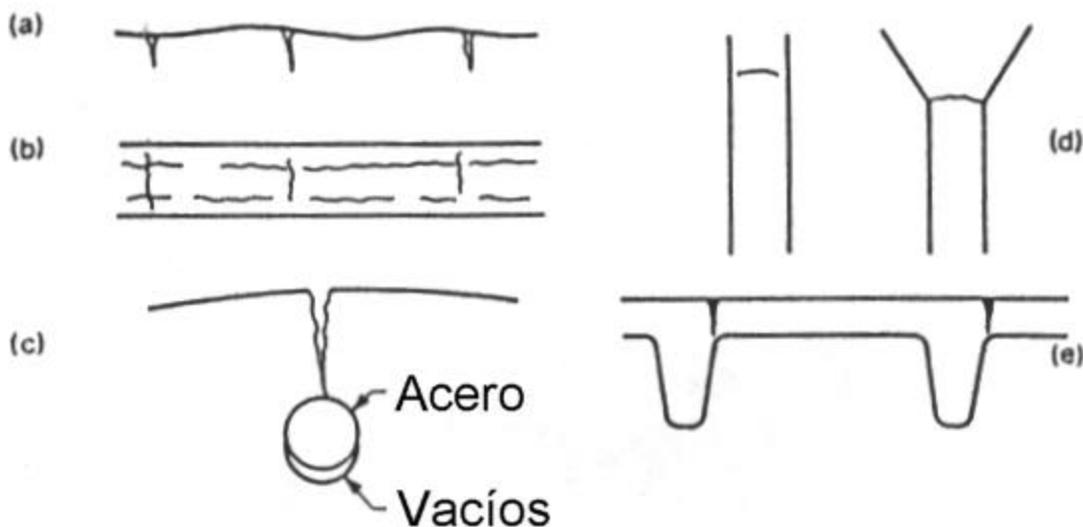


Figura 47. Grietas por asentamiento plástico: (a) Elevación; (b) Planta; (c) Detalle; (d) Columna; (e) Trough % Waffle.

Consecuencias

Concentración de tensiones internas en ingularidades de la estructura en cuanto a forma (variaciones espesor o nivel) debido a descensos diferenciales.

Produce grietas por asentamiento plástico si la decantación está restringida.

Grietas en general no cruzan la sección total del hormigón y se detienen en la armadura causante de la restricción (visibles después de 15 minutos)

Casos en que debe considerarse:

Obras de edificación en cambios pronunciados de sección (puntos de unión de pilares o muros con cadenas, vigas y losas).

Columnas, muros y vigas altas.

Gran densidad de armaduras en borde superior de losas profundas ($c < 0,3$ h)

Fricción y moldajes estrechos

Procedimientos para evitarlo:

En general no se puede eliminar restricciones por ser parte inherente de la construcción.

Efectuar hormigonado en singularidades de forma en distintas etapas constructivas o dejar tiempo de espera (45 a 60 minutos).

Reducir capacidad de exudación del hormigón (minimizar agrietamiento aumentando cohesión mezcla, uso aire incorporado, aumentar dosis arena).

Aplicar curado eficiente inmediatamente después de colocado.

Revibrar hormigón fresco (1/2 a 1 hora después colocado).

Colocar hormigón en capas delgadas y demorar operaciones de terminación

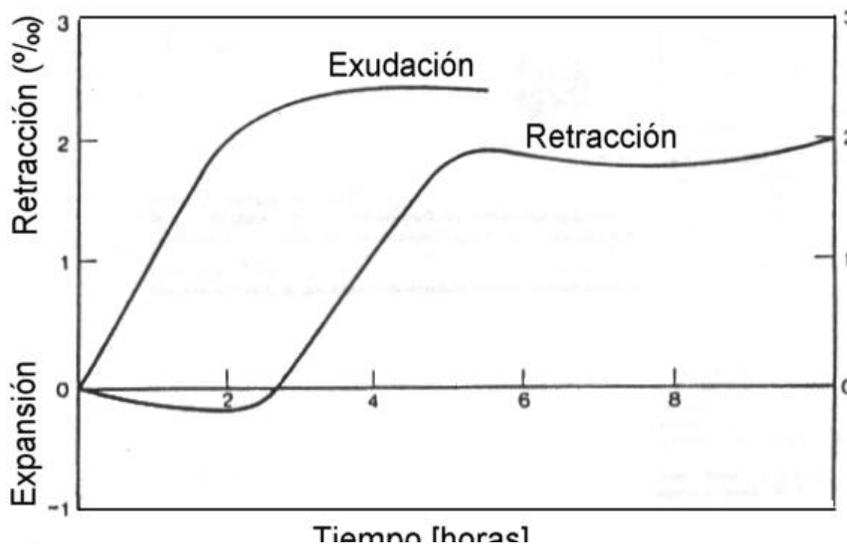


Figura 48. Retracción y Expansión de hormigón joven.

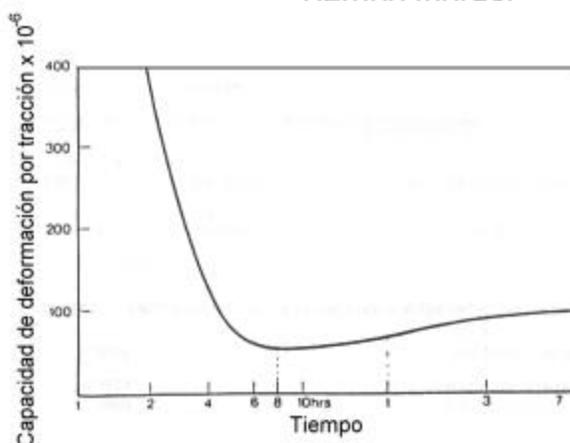


Figura 49. Extensibilidad o Capacidad de deformación unitaria a temprana edad.

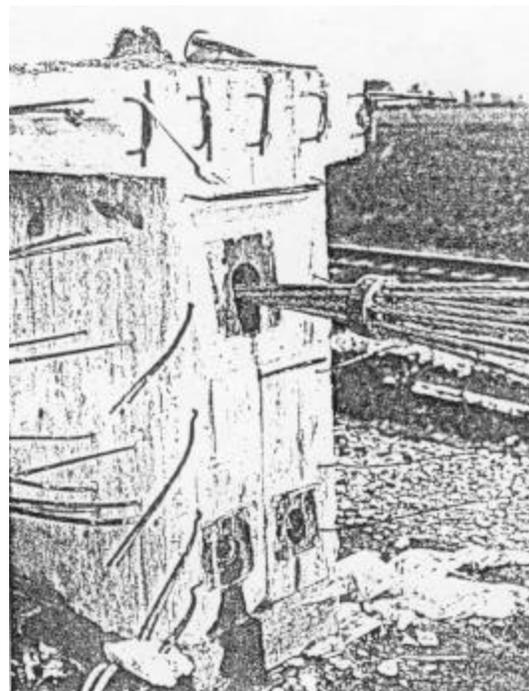
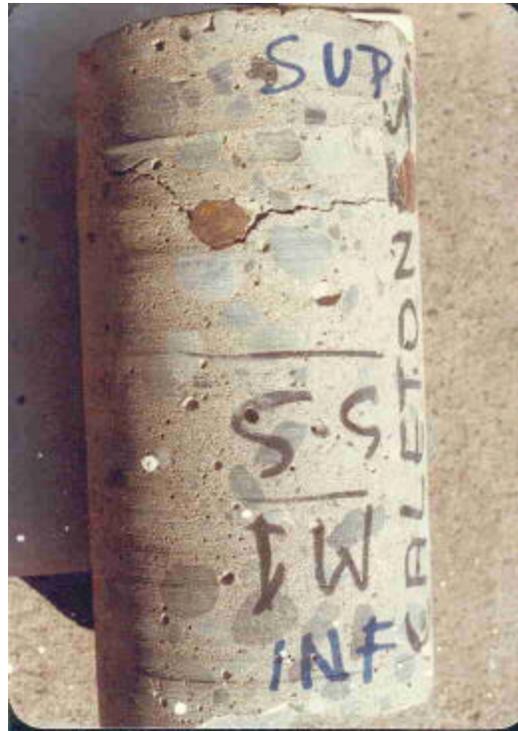
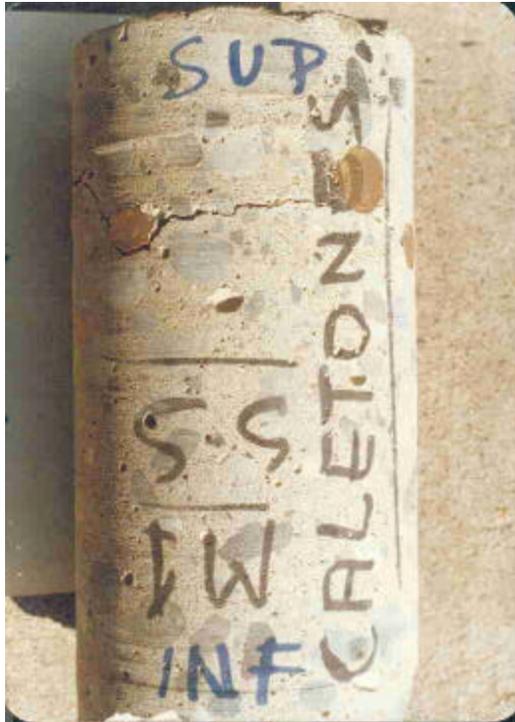


Figura 50. Descripción.....

• RETRACCIÓN PLÁSTICA

Definición

Contracción del hormigón fresco por evaporación agua amasado (<1%)

Origen

Proceso de secado rápido del hormigón sometido a alta temperatura o corrientes de viento

Principales Factores

Velocidad de exudación

Velocidad de evaporación:

Humedad relativa del aire

Temperatura

Velocidad del viento

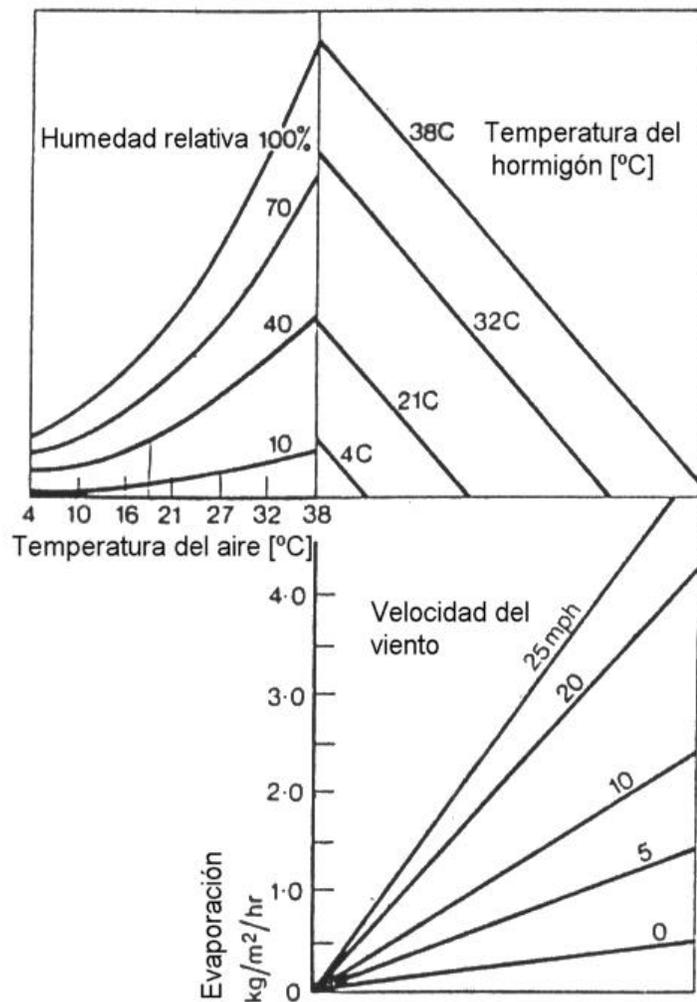


Figura 51. Evaporación del agua para distintas humedades relativas, temp del hormigón y velocidad del viento

Consecuencias

Evaporación agua amasado

Secado progresivo

Formación zonas contacto fases líquidas y gaseosas en capilares

Proceso de tensión superficial zonas sometidas a secamiento

Contracción diferencial

Se produce agrietamiento por retracción plástica si:

Velocidad de evaporación > velocidad de exudación

Según ACI hay riesgo de agrietamiento si la velocidad de evaporación > 1 kg/m²/hr

Grietas anchas en la superficie (1 a 2 mm) cruzan la losa, pero se cierran hacia abajo. No se extienden hasta el borde de la losa.

Se generan 1/2 a 2 hr después de la evaporación del agua.

Son visibles al día siguiente.

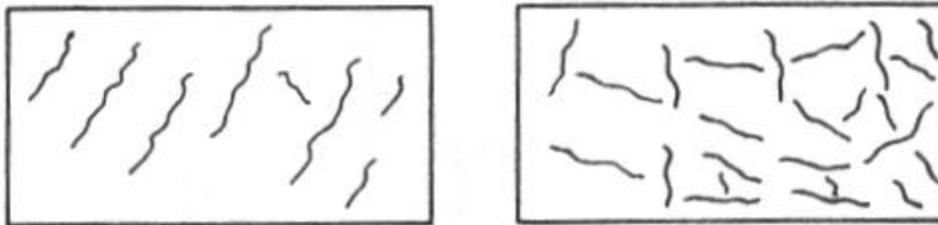


Figura 52. Grietas por retracción plástica

Casos en que debe Considerarse

Hormigonado en períodos de alta temperatura o fuertes vientos.

Elementos planos expuestos ambiente: pavimentos, losas

Procedimientos para Atenuarlas:

Se debe actuar rápido

Velocidad de evaporación < velocidad de exudación [xxx] minimizar evaporación

Aplicar curado inicial del hormigón con neblina dentro de 1/2 a 1 hora después de colocado (en periodos de alta temperatura o fuerte viento). Colocar una membrana de curado apenas se pueda. Si la superficie del hormigón se ve brillante, ya se fue el agua.

Colocar corta vientos

Cubrir con laminas de polietileno continuas (evitar túneles de viento)

Usar técnica de hormigón al vacío

Membranas impermeables bajo las losas del piso aumentan riesgo de agrietamiento

Aditivos superfluidificantes son peligrosos



Figura 53. Descripción....

• FALSO FRAGUADO DEL CEMENTO

Definición

Rigidización instantánea del cemento al mezclar con agua sin generación apreciable de calor.

Origen

Cristalización del yeso deshidratado (CaSO_4) por recuperación del agua de cristalización perdida por altas temperaturas generadas durante el proceso de molienda y por mezcla con clínter muy caliente.

Precipitación de CaCO_3 formado por reacción de Ca(OH)_2 con álcalis del cemento carbonatados durante el almacenamiento.

Distinguir de fraguado relámpago: reacción C_3A puro + agua

Medición

(Según el ensayo ASTM c 451-83 para verificar falso fraguado)

Consecuencias

Pérdida de trabajabilidad del hormigón en los primeros minutos posteriores a la adición del agua.

Reamasado del hormigón, sin adicionar agua, restituye plasticidad sin pérdida de resistencia

Procedimientos Para Atenuar Consecuencias:

Aumentar el tiempo de amasado

Rompe cristalización producida

Reduce rendimiento hormigonado

Ejemplo, Rapel : El aumento del tiempo de amasado de 2 a 3 minutos por cada 3 m^3 hormigón redujo el rendimiento hormigonado de $100 \text{ m}^3/\text{hr}$ a $60 \text{ m}^3/\text{hr}$.

CONTROL DEL HORMIGÓN FRESCO

• FRECUENCIA DE MUESTREO SEGÚN NCH 170

Recomienda establecer la frecuencia mínima de muestreo de acuerdo con el volumen de hormigón de la obra y la resistencia especificada:

Tabla 5. Frecuencia mínima de muestreo

Ensayos	Volumen de Hormigón de la Obra				
	< 500 m ³		≥ 500 m ³		
	Resistencia Especificada, Fc, Mpa				
	< 15	≥ 15	< 15	15 - 30	> 30
Docilidad (Diaria)	1	1	2	3	3
Densidad y Rendimiento (Mínima)	1	1	1 cada 400 m ³ 300 m ³ 200 m ³		
Contenido De Aire * (Mínima)	-	2	1 cada - 75 m ³ 50 m ³		
Uniformidad (Mín)	1		1 cada 500 m ³		

* Obligatorio cuando se empleen aditivos incorporadores de aire.

• EXTRACCION DE MUESTRAS

De acuerdo con NCh 171.

• CONTROL DE ASENTAMIENTO DE CONO

El control de asentamiento de cono se recomienda realizarlo al menos cada 16 m³ de hormigón elaborado, y en lo posible cada camión, o sea cada 6 u 8 m³ y no menos de dos veces al día.

Se debe efectuar de acuerdo con especificaciones de NCh 1019.

Se debe ejecutar en el lugar de colocación del hormigón.

Se debe establecer la diferencia de cono entre la planta de hormigón y el hormigón al colocarse. La planta debería ajustar la dosis de agua para entregar un hormigón de trabajabilidad constante.

Para disminuir variaciones en la trabajabilidad de diferentes cachadas, o entre la planta y el frente, se debe mantener el árido saturado. Esto evita una absorción de agua, por el árido, en la mezcla.

Para hormigones muy secos se recomienda sustituir el cono de Abrams por el ensayo de consistencia Vebe y para hormigones muy fluidos por la mesa de flujo DIN.

• DENSIDAD DEL HORMIGÓN FRESCO

Se debe medir densidad del hormigón fresco de acuerdo con NCh 1564, llevando una estadística de los resultados. Este control permitirá detectar variaciones en la dosificación o pesaje de los materiales. Este control se recomienda hacerlo cada 100 m³.

Si la variación de la densidad medida es superior a 20 kg/m³, se debe realizar control de cantidad de agua en el hormigón y de porcentaje de árido grueso en hormigón fresco.

La norma NCh 170 acepta una desviación de $\pm 2\%$ de la densidad teórica. Con la información obtenida se debe ajustar la dosificación o revisar el funcionamiento de la planta.

Además la norma NCh 170 acepta el rendimiento, si la dosis de cemento calculada no difiere en más de $\pm 2\%$ de la establecida en la dosificación. De lo contrario, ajustar la dosificación o revisar el funcionamiento de la planta.

• TEMPERATURA DEL HORMIGÓN FRESCO

Se debe medir la temperatura del hormigón fresco continuamente, y llevar una estadística de los valores obtenidos. Se debe indicar la hora de muestreo en esta estadística.

La temperatura se puede medir en planta o en el frente al tomar las muestras.

• CANTIDAD DE AGUA EN EL HORMIGÓN FRESCO

Este control se ejecuta secando una masa conocida de hormigón fresco en estufa.

Se debe hacer la medición de 10 muestras para conocer los valores normales obtenidos.

Se debe realizar diariamente hasta completar los primeros 10 valores, luego cada 100 m³ o cuando se produzca una variación en trabajabilidad o densidad del hormigón.

Debido al tiempo requerido para determinar la humedad de los áridos, la determinación de la cantidad de agua en el hormigón fresco no puede usarse normalmente para corregir las variaciones de la dosis de agua en uso en el hormigón, sino como una verificación indirecta de si se han producido variaciones de su granulometría total.

Por lo tanto se estima como criterio aceptable calcular la razón W/C y llevar un registro del promedio móvil de dos mediciones sucesivas. Se sugiere usar como rango de aceptación $\pm 0,03$ con respecto a la razón teórica prevista en la dosificación del hormigón. Corregir la dosis de cemento al excederse dicho límite y revisar la dosificación completa si se excede un rango de $\pm 0,06$ de dicho valor teórico.

Cualquier agregado de agua en el frente debe ceñirse a lo indicado en los Procedimientos para Control de Calidad, indicados en las Especificaciones Técnicas.

- **ÁRIDO GRUESO EN HORMIGÓN FRESCO**

Es un control que se debe realizar en una secuencia similar a la del punto anterior.

Se realiza tamizando una cantidad conocida de hormigón por tamiz de 5 mm., y pesando el árido retenido una vez secado superficialmente.

- **CONTENIDO DE AIRE INCORPORADO**

NCh 170 acepta el contenido de aire cuando cumple el valor especificado \pm 1%.

INDICE

INTRODUCCION	3
• CARACTERÍSTICAS DEL ENDURECIMIENTO	3
• PROPIEDADES DEL HORMIGON ENDURECIDO	4
• EVALUACIÓN PROPIEDADES HORMIGON ENDURECIDO	5
DENSIDAD DEL HORMIGÓN.....	6
RESISTENCIA DEL HORMIGÓN	10
• FACTORES GENERALES QUE AFECTAN RESISTENCIA	11
• MODOS DE FALLA EN EL HORMIGON	12
➤ Resistencia a la Tracción de Materiales Frágiles.....	14
➤ Resistencia a Compresión de Materiales Frágiles.....	15
• CRITERIO PRACTICO DE RESISTENCIA	16
• RELACIÓN RESISTENCIA - POROSIDAD.....	17
• RELACIÓN GEL/ESPACIO	20
• VACIOS TOTALES EN EL HORMIGON	21
• DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE POROS.....	23
• MICROFISURACION Y RELACION TENSION-DEFORMACION.....	24
• COMPORTAMIENTO DEL HORMIGON BAJO VARIOS ESTADOS DE TENSION.....	27
• ENSAYOS DE RESISTENCIA DEL HORMIGÓN.....	28
RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN.....	29
ENSAYO.....	29
➤ Cálculo de la Resistencia a Compresión.....	29
➤ Factores o Condiciones a Considerar en el Ensayo	30
• FORMA Y DIMENSIONES DE LA PROBETA.....	31
➤ Dimensiones de la Probeta.....	31
➤ Factores de Conversión para Probetas Cilíndricas por Esbeltez.....	32
➤ Factores de Conversión para Probetas Diferentes Dimensiones	34
➤ Forma de la Probeta	35
➤ Factores de Conversión para Probetas Diferentes Formas.....	35
• CONDICIONES DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO	37
➤ Equipo de Ensayo	37
➤ Rótulas y Homogeneidad del Hormigón en su Sección.....	38

➤ Velocidad de Aplicación de la Carga	39
➤ Dirección de Aplicación de la Carga	40
➤ Estado de las Superficies del Material.....	41
➤ Centrado de la Carga	42
➤ Tamaño de la Probeta en Relación al Tamaño del Árido	42
➤ Tipos de Rotura de Probetas	43
● CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN.....	45
➤ Tipo de Cemento.....	45
➤ Razón Agua/Cemento y Grado de Compactación.....	47
➤ Razón Árido/Cemento	52
➤ Tipo de Árido.....	53
➤ Tamaño Máximo del Árido	53
➤ Edad del Hormigón.....	54
● CONDICIONES AMBIENTALES:.....	58
➤ Humedad del Material.....	58
➤ Temperatura del Material.....	62
● CONCEPTO DE MADUREZ.....	66
➤ Aplicaciones del Concepto de Madurez del Hormigón.....	74
➤ Uso de las Funciones de Madurez.....	75
➤ Curado Acelerado	76
➤ Ensayos de Curado Acelerado:.....	77
➤ Curado Acelerado Versus Resistencia a 28 Días [DICTUC, APUNTES 10, 1983]	80
➤ Curado al Vapor a Presión Atmosférica ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$).....	81

INTRODUCCION

- **CARACTERÍSTICAS DEL ENDURECIMIENTO**

Proceso físico - químico complejo

Proceso continuo de larga duración (años)

Propiedades hormigón endurecido:

Evolucionan con el tiempo

Dependen de:

Materiales componentes:

Características
Proporciones

Condiciones ambientales durante:

Construcción
Curado
Servicio

Procedimientos de:

Fabricación
Construcción

Solicitaciones de servicio:

Tipo
Magnitud
Historia

• PROPIEDADES DEL HORMIGON ENDURECIDO

FISICAS

DENSIDAD
IMPERMEABILIDAD
ETC.

MECANICAS

RESISTENCIA:

- a la Compresión
- a la Tracción
- Otras: a la fatiga, desgaste, impacto, etc.

PROPIEDADES ELÁSTICAS Y PLÁSTICAS

- Módulo de Elasticidad
- Fluencia lenta o Creep

SERVICIABILIDAD

VARIACIONES DE VOLUMEN

- Retracción Hidráulica
- Retracción Térmica
- Retracción por Carbonatación

DURABILIDAD

- Agentes Físicos
- Agentes Químicos

CONSTRUCTIVAS

- Dimensionales
- Terminación de superficie:
 - regularidad superficial
 - textura
- Juntas

• EVALUACIÓN PROPIEDADES HORMIGON ENDURECIDO

Previsión propiedades no es posible deducirla directamente de las características del proceso

- **Medición:** directa a través de ensayos
- **Alcance:** resultados son relativos a las condiciones del ensayo

Factores que afectan calidad de información de ensayos mecánicos

MATERIALES	EQUIPOS	MÉTODO ENSAYO	ERRORES
Humedad Temperatura	Deformación o carga controlada	Tipo de sollicitación en función propiedad a determinar	Humanos Calibración
Edad	Rigidez máquina ensayo	Tiempo y velocidad aplicación carga	equipos e instrumentos
Métodos fabricación	Rigidez platos de carga	Dimensiones y forma probeta	
Composición	Precisión medición carga y deformación	Relación tamaño fases (tamaño gramos) y dimensión probeta	
		Disposición de las cargas	
		Efectos de borde: concentración tensiones y excentricidades	
		Técnica de muestreo	
		Tipo de rotura	

Los ensayos deben, por lo tanto, ejecutarse bajo condiciones y variables normalizadas

ENSAYOS NORMALIZADOS

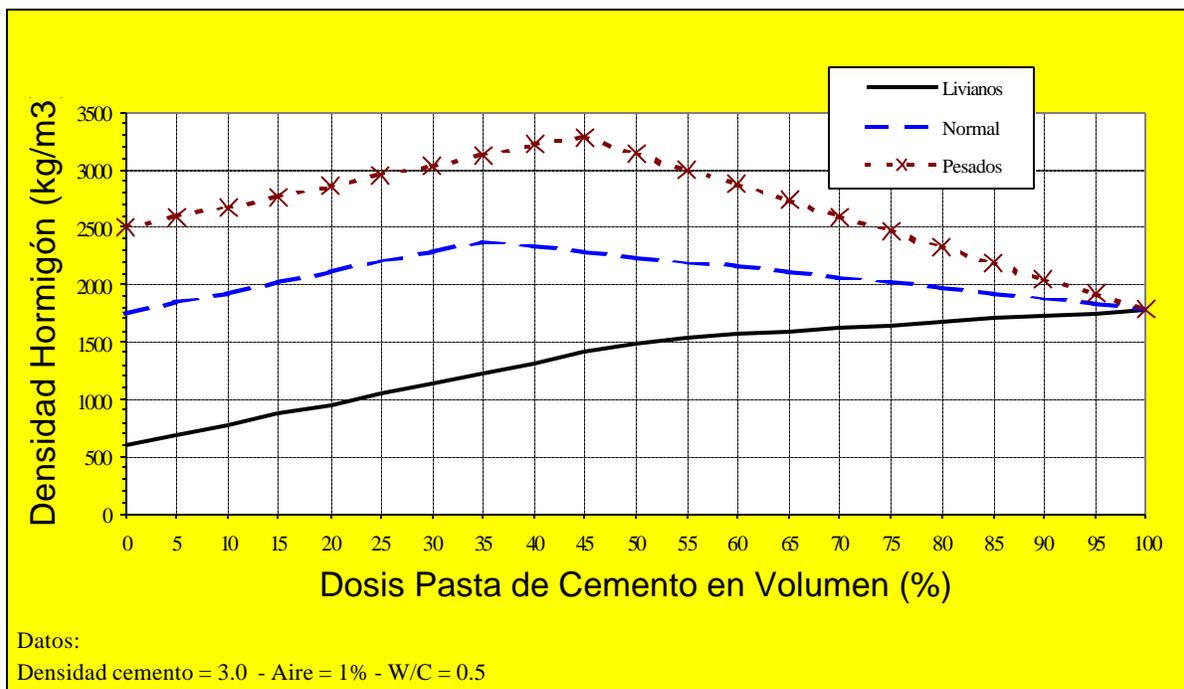
DENSIDAD DEL HORMIGÓN

DEFINICIÓN:

Peso materiales constituyentes por unidad de volumen

DEPENDEN DE

Las proporciones y el peso específico de los materiales.



VALORES NORMALES

Hormigones convencionales: 2,35 - 2,55 kg/dm³

Materiales granulares provenientes de rocas no mineralizadas
Varía poco con el tiempo

Causa: pérdida humedad por evaporación del agua de amasado
Baja 7 a 8 % de la densidad inicial

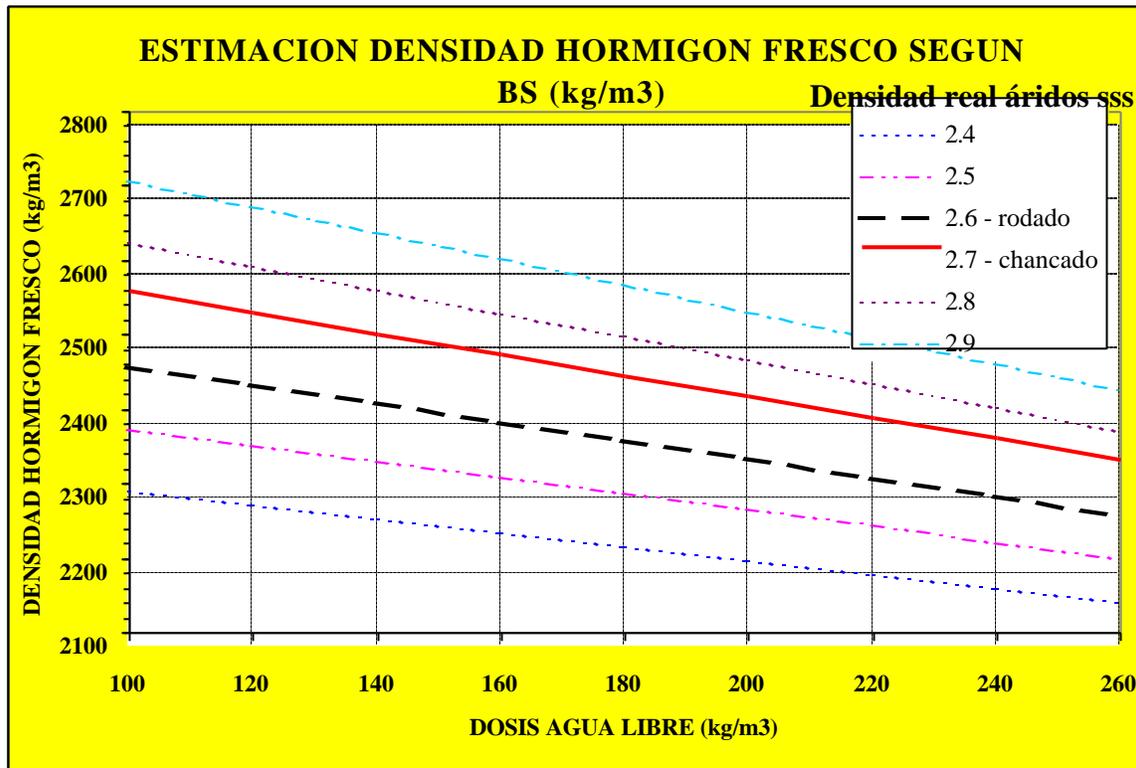
CÁLCULO:

$$r = 10g_a (100 - A) + C \frac{\gamma_c}{\gamma_a} - \frac{\rho_a}{\rho} - W(g_a - 1)$$

$$r = 10g_a (100 - A) + \frac{W}{W/C} \frac{\gamma_c}{\gamma_a} - \frac{\rho_a}{\rho} + (W/C)(1 - g_a)$$

en que:

- ρ = densidad del hormigón fresco (kg/m³)
- γ_a = peso específico ponderado (SSS) de los áridos finos y gruesos combinados
- γ = peso específico del cemento
- A = dosis de aire (%)
- C = dosis cemento (kg/m³)
- W = dosis de agua (kg/m³)



SE PUEDE VARIAR ARTIFICIALMENTE

Hormigones livianos (0,5 a 2,0 kg/dm³)

Se obtienen por incorporación de aire:

- en los áridos (materiales livianos, ej. piedra pómez)
- en la masa del hormigón (aire incorporado)

Hormigones pesados (2,7 a 5,0 kg/dm³)

- materiales pesados (áridos mineralizados de hierro)

Tipo	Agregado		Hormigón		
	Tipo	Densidad aparente suelta (kg/m ³)	Densidad (kg/m ³)	Resistencia a la compresión típica (MPa)	Conductividad térmica (Jm/m ² s°C)
Liviano	Piedra pómez	700	1000	18	0,5
	Arcillas expandidas	400	1600	25	0,6
Normal	Granito	1400	2400	35	1,5
	Caliza				3,5
Pesado	Barita	2500	3400	45	1,4
	Mineral de hierro				

RELACIONADA CON:

Resistencia

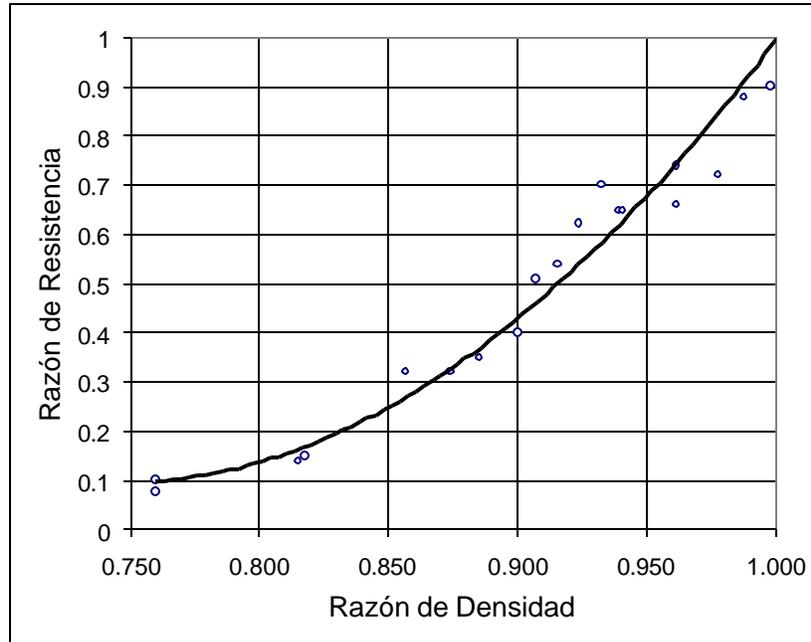


Figura 1. Relación entre razón de resistencia y razón de densidad

Aislación térmica y acústica

► HORMIGONES LIVIANOS

Tipo	Arido	Hormigón	
	Tipo	Densidad (Kg/m ³)	Conductividad térmica (Jm/m ² s°C)
Liviano	Piedra pómez	1000	0,14
	Arcillas expansivas	1600	0,17 – 0,40
Normal	Granito - Caliza	2400	1,5 – 3,5
Pesado	Barita	3400	1,4

Aislación a partículas radiactivas

(escudos de radiación) ► HORMIGONES PESADOS

RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

DEFINICION

Habilidad de un material para resistir tensión sin fallar.

Falla: generalmente identificada con la aparición de grietas (NO ES EL CASO DEL HORMIGON)

En hormigón la resistencia está relacionada con la tensión requerida para producir fractura **P tensión máxima**

IMPORTANCIA

Propiedad del hormigón más valorada y especificada en diseño de hormigón y en control de calidad.

- En algunos casos puede ser más importante la: durabilidad, impermeabilidad, estabilidad de volumen, etc.

Causa:

- Resistencia da un panorama general de la calidad del hormigón porque está directamente relacionada con la estructura de la pasta de cemento.
- Ensayos de resistencia son relativamente fáciles.
- Muchas propiedades del hormigón (módulo de elasticidad, impermeabilidad, etc.) directamente relacionadas con resistencia.

Ensayo: resistencia a la compresión uniaxial a 28 días.

• FACTORES GENERALES QUE AFECTAN RESISTENCIA

Depende fundamentalmente de:

- Estructura física de los productos de la hidratación
- Proporciones volumétricas relativas

En sólidos existe una relación inversa fundamental entre porosidad y resistencia

Fuentes de debilidad:

- grietas, discontinuidades y poros
- áridos (contienen grietas y son causa de microfisuración en la zona de transición)

→ Porosidad: factor primario

→ Factor práctico más importante es la razón W/C

Parámetro subyacente es la POROSIDAD (número y tamaño de poros)

• MODOS DE FALLA EN EL HORMIGON

- Solicitaciones sobre estructuras inducen tensiones en material constituyente
- Tensiones pueden producir primero fracturas locales si sobrepasan la capacidad resistente del material
- Análisis seguridad obra
 - Tensiones producidas < Capacidad resistente del material
 - Conocimientos propiedades resistentes:
 - Resistencia a tensiones normales (Compresión, Tracción y Corte)
 - Resistencia a tensiones combinadas
- Condiciones de fractura

► TEORÍAS DE ROTURA O MECÁNICA DE LA FRACTURA

RANKINE:

Máxima tensión compresión = Resistencia a compresión

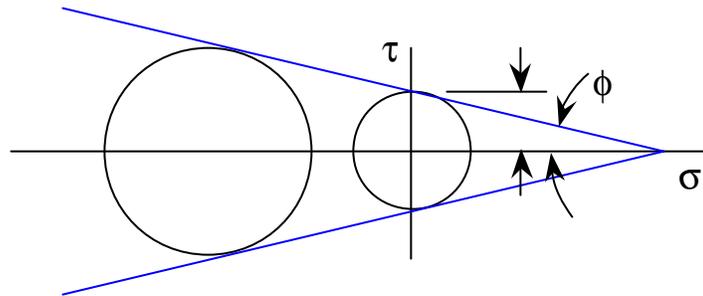
COULOMB:**Máxima fricción interna**

Figura 2. Envoltente de falla en el caso de la teoría propuesta por Coulomb

Tensión de corte máxima

Máxima tensión cortante = $\frac{1}{2}$ Resistencia a la tracción

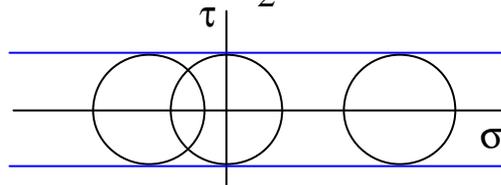


Figura 3. Envoltente de falla para el caso de que la resistencia del material quede dada por su resistencia al corte.

SAINT VENANT:

Máxima deformación elástica normal = $\frac{\text{Resistencia tensión normal}}{\text{Módulo de deformabilidad}}$

VON MISES:

Resistencia a compresión = $\frac{\text{Máxima energía de deformación}}{\text{Unidad volumen}}$

MOHR:

Estado tensiones círculo Mohr → Curva intrínseca del material

➤ Resistencia a la Tracción de Materiales Frágiles

Resistencia teórica = 1000 * Resistencia real medida

GRIFFITH:

Falla debida a la propagación de grietas.

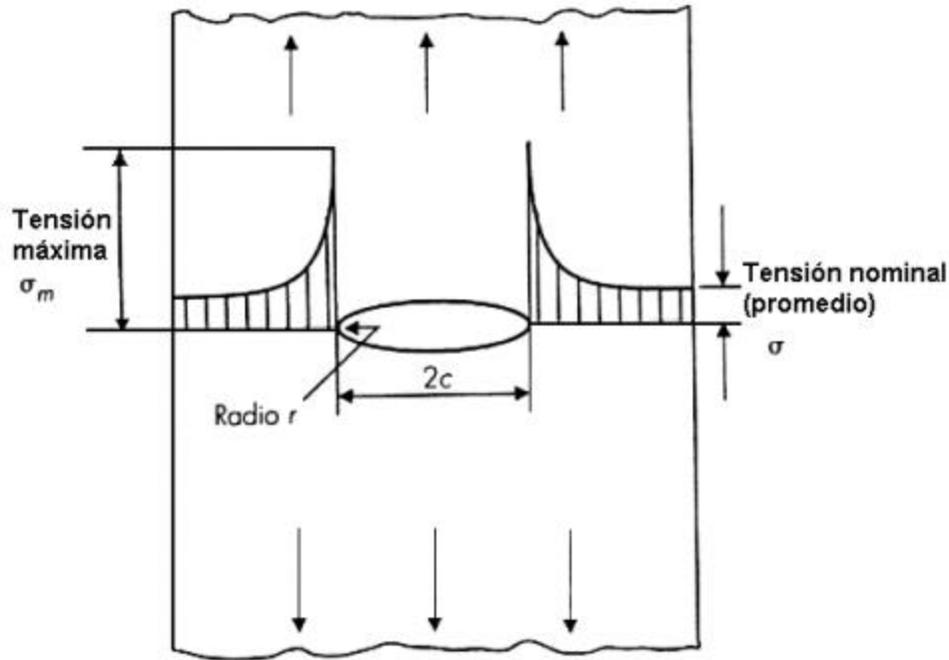


Figura 4. Concentración de tensiones en el extremo de una grieta en un material frágil bajo tracción

Resistencia a la fractura frágil σ_f :

$$\sigma_f = \left[\frac{WE}{\pi c} \right]^{1/2}$$

en que:

W = Trabajo requerido para producir fractura

E = Módulo de elasticidad

$$\frac{\sigma_m}{\sigma} = 2 \left(\frac{c}{r} \right)^{1/2}$$

Tensión máxima es mayor cuando la grieta es más larga y aguda

Por probabilidad estadística:

→ Tamaño y la forma de la probeta son factores en la resistencia

➤ **Resistencia a Compresión de Materiales Frágiles**

OROWAN

Falla por estado de carga biaxial.

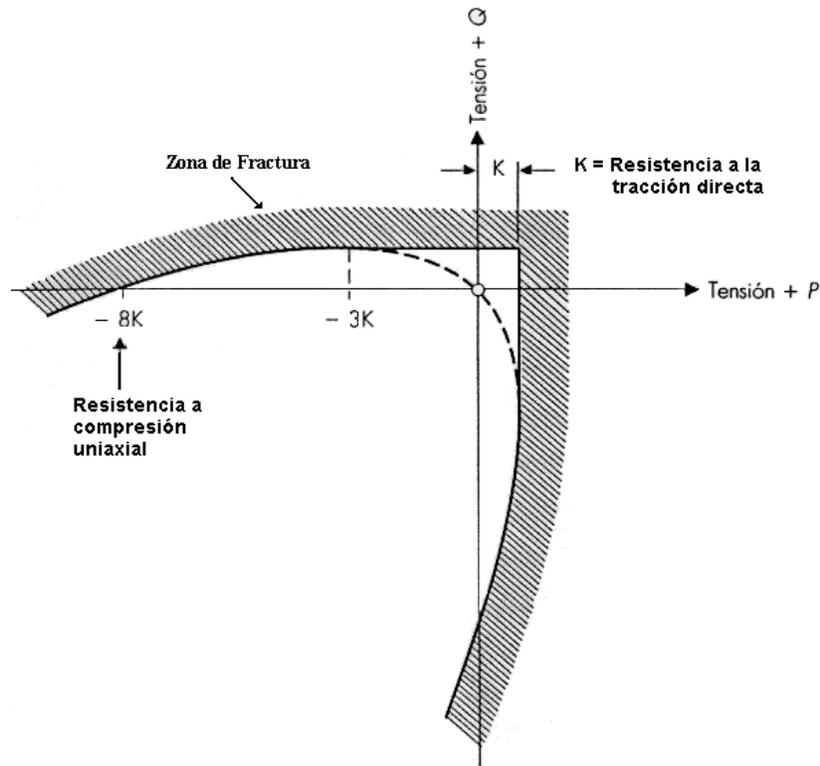
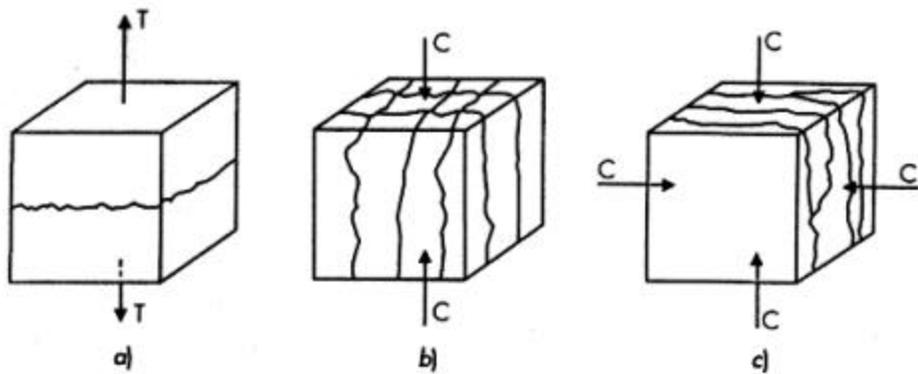


Figura 5. Criterio de Orowan para fractura bajo esfuerzo biaxial



a) tracción uniaxial, b) compresión uniaxial, c) compresión biaxial

Figura 6. Patrones de fractura del hormigón bajo:

- **CRITERIO PRACTICO DE RESISTENCIA**

“CRITERIO DE DEFORMACION UNITARIA LIMITE”

En Tracción: $100 \cdot 10^{-6}$ a $200 \cdot 10^{-6}$

En Compresión: $2000 \cdot 10^{-6}$ a $4000 \cdot 10^{-6}$

Valor usado en diseño = $3500 \cdot 10^{-6}$

Valor real depende de:

Método de ensayo

a menor velocidad de carga mayor deformabilidad

Grado del hormigón

a mayor resistencia menor deformabilidad

• RELACIÓN RESISTENCIA - POROSIDAD

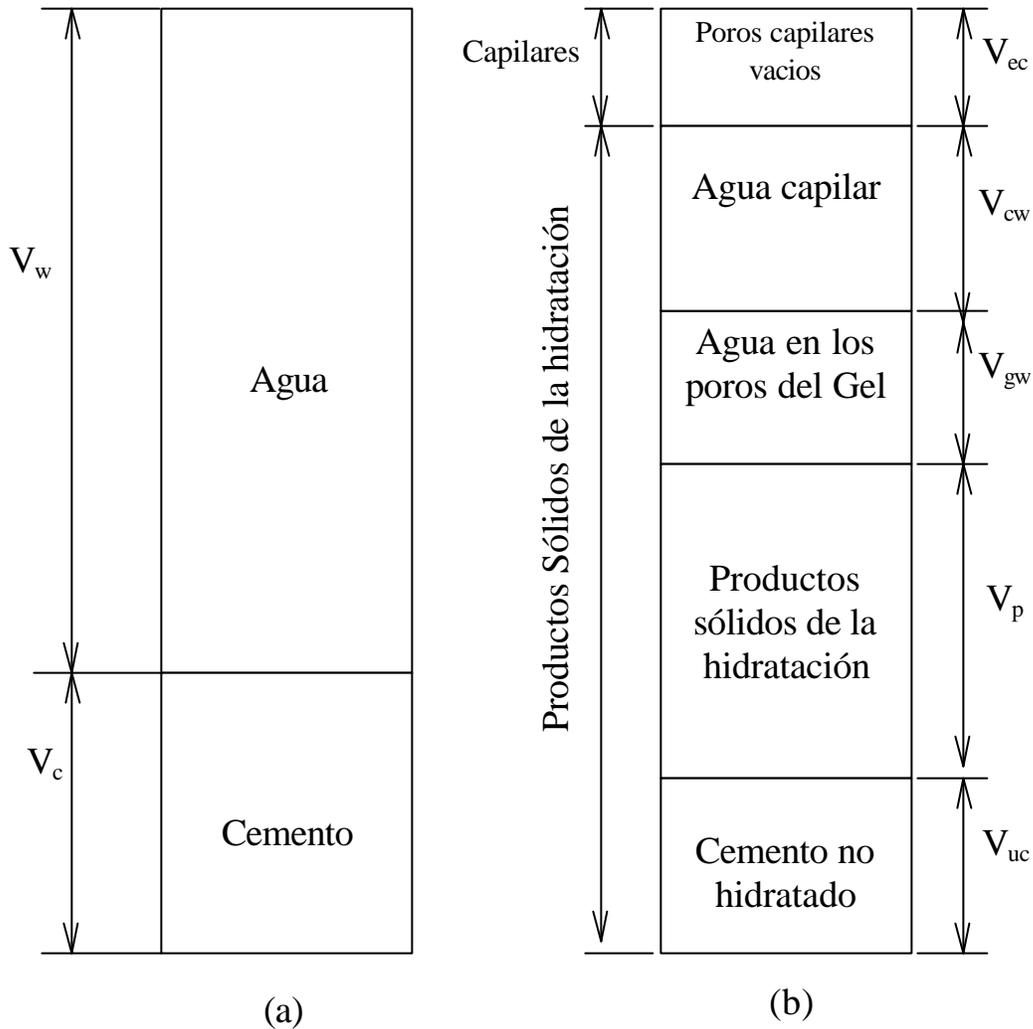


Figura 7. Representación de las proporciones volumétricas:

- Antes de la hidratación (grado de hidratación, 0), y
- durante la hidratación (grado de hidratación < 1.0).

Porosidad capilar:

$$P_c = \frac{V_{wc} + V_{cv}}{V_c + V_w} = \frac{W/C + a/C - 0.36}{0.317 + W/C + a/C}$$

Porosidad total:

$$P_t = \frac{V_{wg} + V_{wc} + V_{cv}}{V_c + V_w} = \frac{W/C + a/C - 0.17h}{0.317 + W/C + a/C}$$

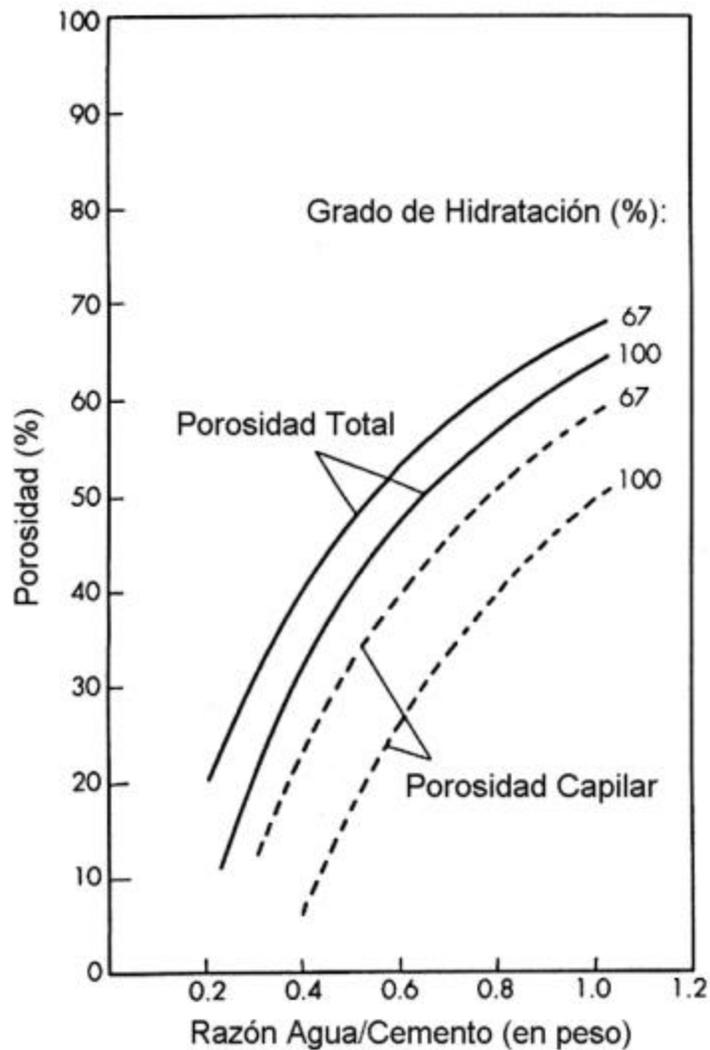


Figura 8. Influencia de la razón agua/cemento y el grado de hidratación en las porosidades capilar y total de la pasta de cemento

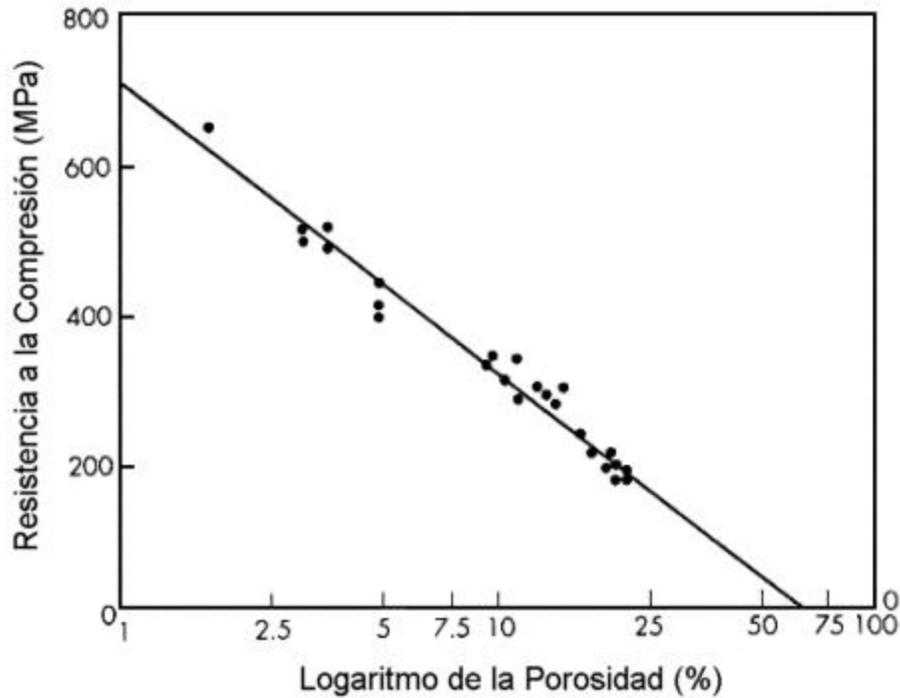


Figura 9. Relación entre resistencia a compresión y logaritmo de la porosidad de compactos de pasta de cemento para diversos tratamientos de presión y alta temperatura

La relación inversa entre porosidad y resistencia no está limitada a productos cementicios; es aplicable generalmente a una gran variedad de materiales

$$f_c = f_0 * e^{-kp}$$

en que:

f_c = resistencia de un material con porosidad p

f_0 = resistencia intrínseca material porosidad cero

k = constante

• RELACIÓN GEL/ESPACIO

$$\text{Razón } \frac{\text{Gel}}{\text{Espacio}} = X = \frac{\text{Volumen Gel Cemento}}{\text{Volumen Gel Cemento} + \text{Poros Capilares}}$$

$$\text{Razón } \frac{\text{Gel}}{\text{Espacio}} = \frac{V_p + V_{wg}}{(V_p + V_{wg}) + (V_{wc} + V_{cv})} = \frac{0.678 h}{0.318 + \frac{W}{C} + \frac{a}{C}}$$

Figura 10. Relación entre la resistencia a la compresión de mortero y la razón gel/espacio

Powers (morteros)

$$f_{c28} = a * X^b \quad \text{con } a = 234 \text{ MPa}, b = 3 \text{ y } X = (1 - p)$$

• VACIOS TOTALES EN EL HORMIGON

$$V_v = V_{wg} + V_{wc} + V_{cv} + a = \left[\frac{W}{C} - 0.17h \right] C + a$$

Figura 11. Proporciones volumétricas del hormigón de una mezcla de proporciones 1 : 2 : 4 por masa, con una razón agua/cemento de 0,55 y contenido de aire atrapado de 2,3 %:

- a) Antes de la hidratación
- b) Cuando el grado de hidratación es $h = 0,7$

Porosidad del hormigón:

$$P = \frac{V_v}{V} = \frac{\frac{W}{C} - 0.17h + \frac{a}{C}}{0.317 + \frac{A_r}{\rho_r C} + \frac{A_c}{\rho_c C} + \frac{W}{C} + \frac{a}{C}}$$

Caso	Dosis (masa)	W/C	Aire	Arido	Agua capilar	Agua del gel	Prod. Sólidos de la hidratación	Cemento no hidratado
(a)	1 : 4	0,40	2,3	66,6	6,4	5,8	14,8	4,1
(b)	1 : 6	0,55	2,3	71,0	9,2	4,1	10,5	2,9
(c)	1 : 9	0,75	2,3	74,7	10,8	2,8	7,4	2,0

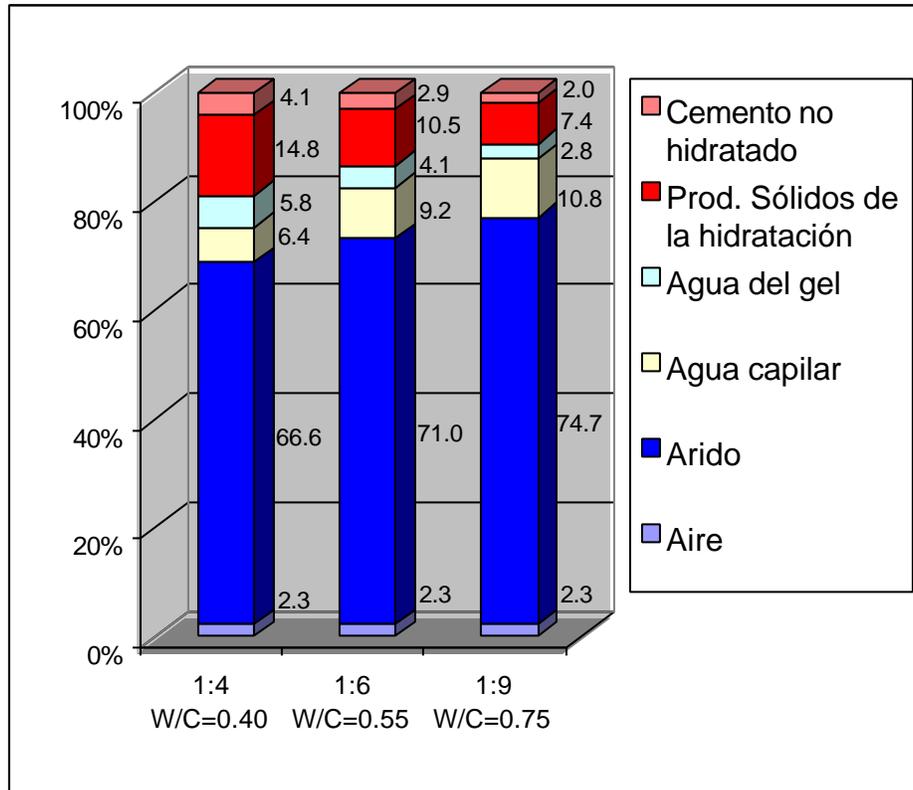


Figura 12. Proporciones volumétricas del hormigón con un grado de hidratación $h = 0,7$ para diferentes mezclas (Peso específico áridos = 2,6 ; contenido aire atrapado = 2,3%)

• DISTRIBUCION DEL TAMAÑO DE POROS

- Diámetros:
 - Poros del gel $\approx 2 \text{ nm}$ ($80 \cdot 10^{-9} \text{ in}$) ® **Impermeables**
 - Poros capilares $\approx 1 \mu\text{m}$ ($40 \cdot 10^{-6} \text{ in}$)
- Sistema interconectado de poros capilares reduce resistencia y aumenta impermeabilidad (reduce resistencia a ataques de congelamiento y químico)
- Vulnerabilidad depende de la razón W/C
- Problema se evita si el grado de hidratación es suficiente para segmentar el sistema de poros capilares

Tabla 1. Período aproximado de curado requerido para producir el grado de hidratación al que se segmentan los poros

Razón W/C	Grado de hidratación (%)	Período de curado requerido
0.40	50	3 días
0.45	60	7 días
0.50	70	14 días
0.60	92	6 meses
0.70	100	1 año
Sobre 0.70	100	IMPOSIBLE

- A mayor finura del cemento más corto es el período de curado necesario para producir un grado de hidratación dado, con una razón W/C determinada.

• MICROFISURACION Y RELACION TENSION-DEFORMACION

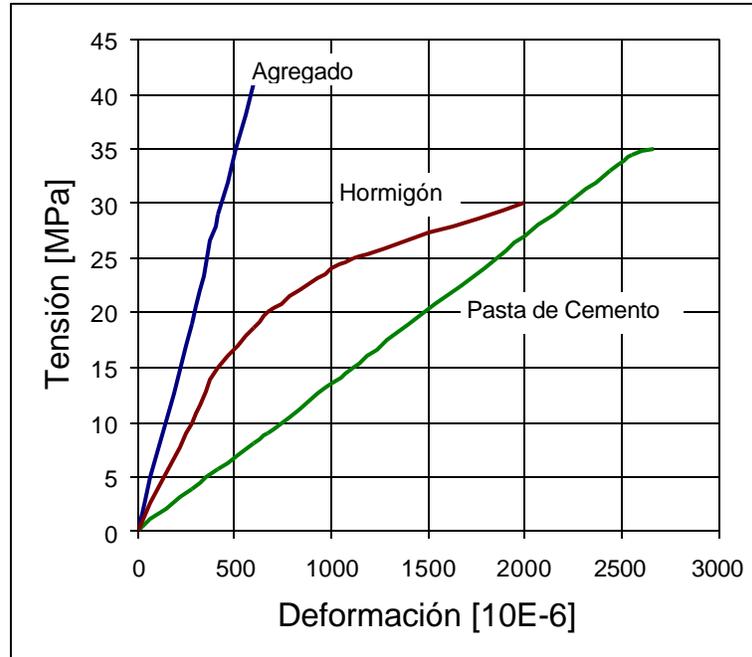


Figura 13. Relaciones Tensión – Deformación para pasta de cemento, árido y hormigón

Las propiedades de materiales compuestos complejos no necesitan ser iguales a la suma de las propiedades de los componentes.

Figura 14. Representación esquemática del comportamiento tensión – deformación del hormigón bajo compresión uniaxial

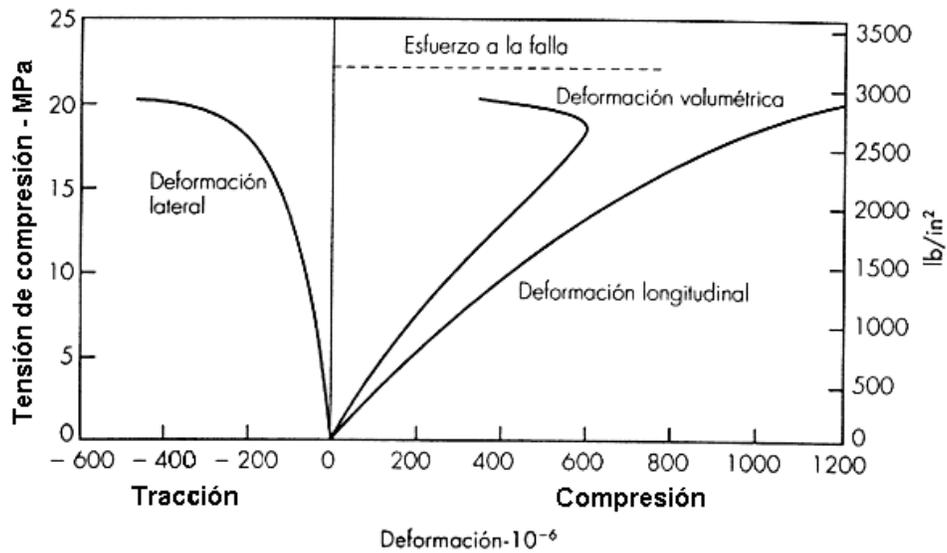


Figura 15. Deformaciones unitarias en un prisma ensayado hasta rotura en compresión

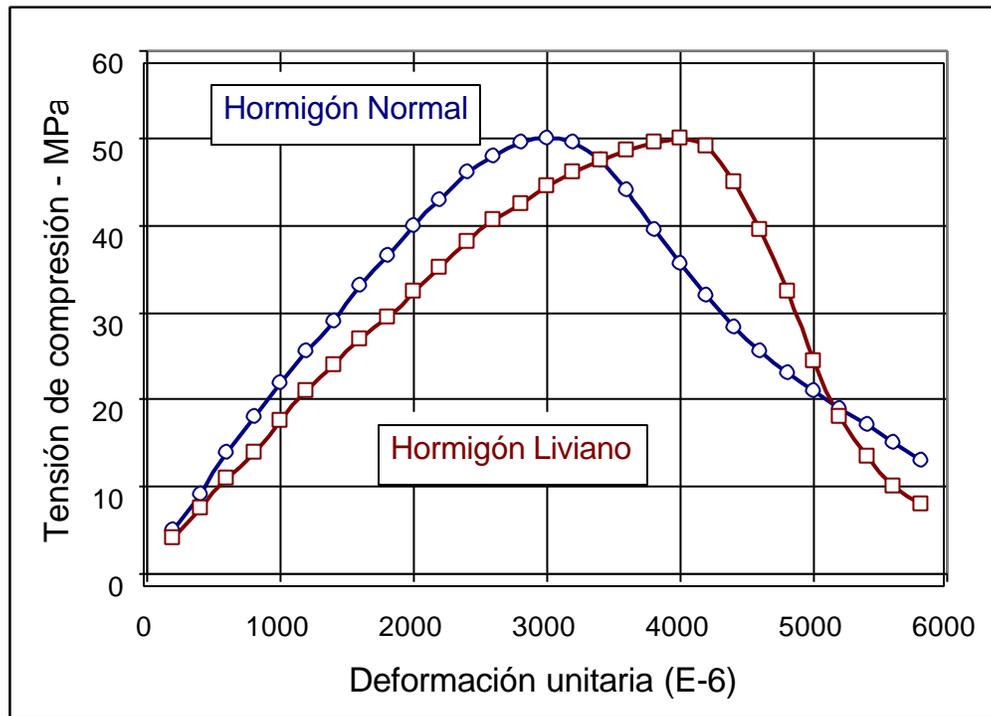
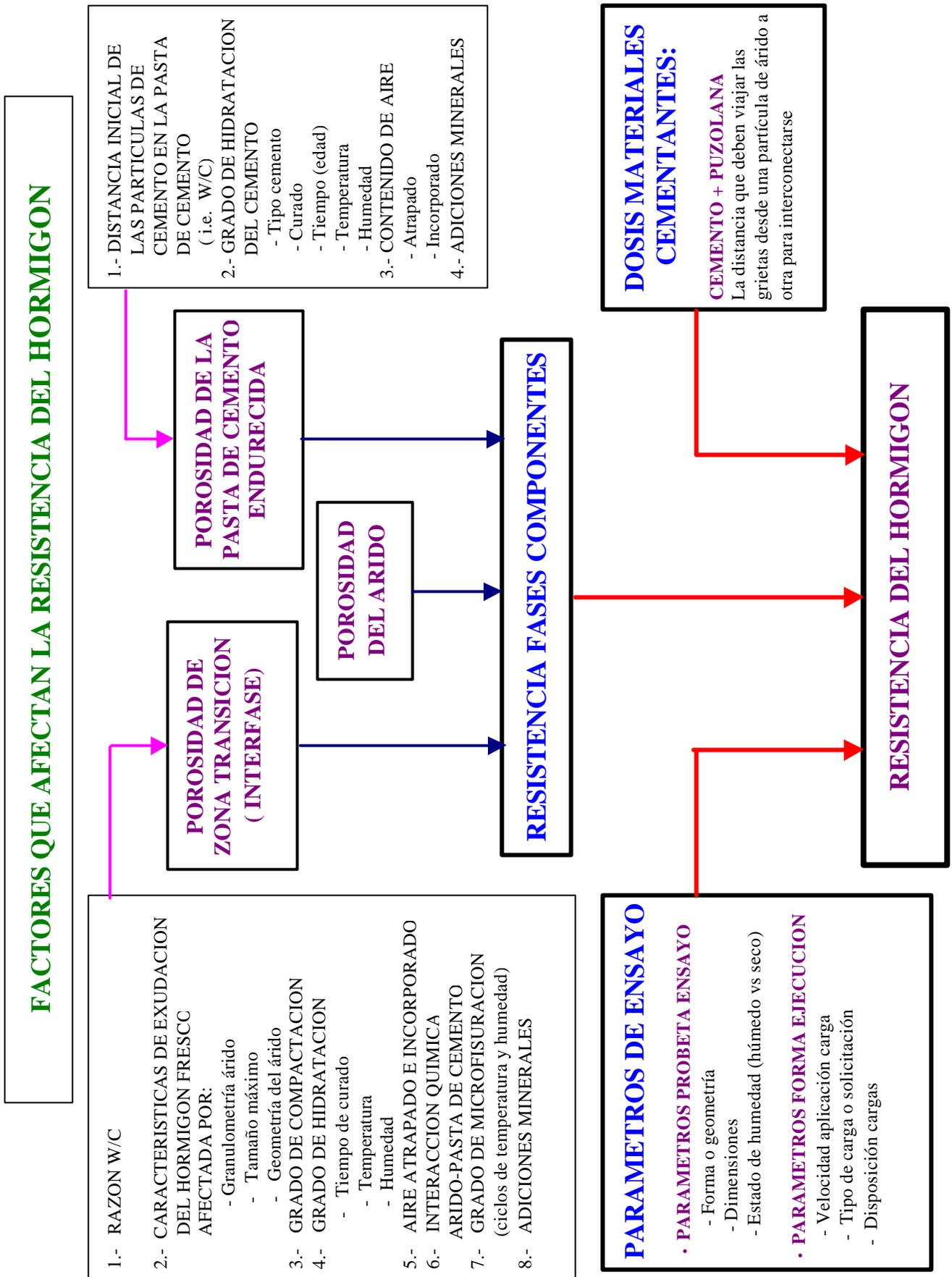


Figura 16. Relación tensión- deformación para hormigones ensayados a velocidad constante de deformación

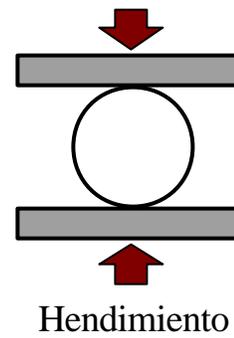
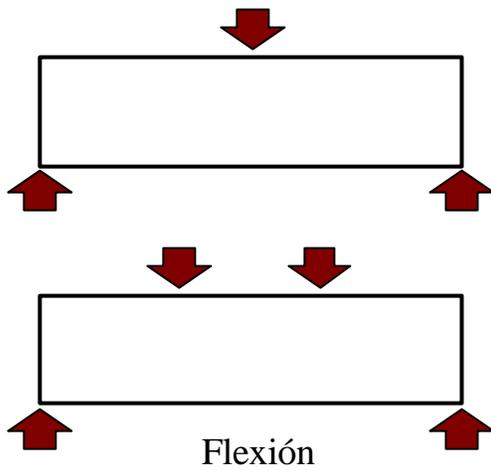
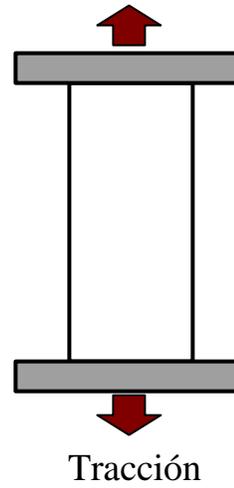
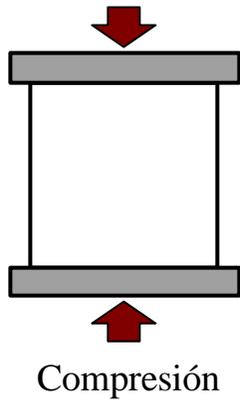


• COMPORTAMIENTO DEL HORMIGON BAJO VARIOS ESTADOS DE TENSION

TENSION CORTANTE

TENSIONES BIAXIALES Y MULTIAXIALES

• ENSAYOS DE RESISTENCIA DEL HORMIGÓN



RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN DEL HORMIGÓN

• ENSAYO

Procedimiento de ensayo a compresión uniaxial
NCh 1 307 Of. 77

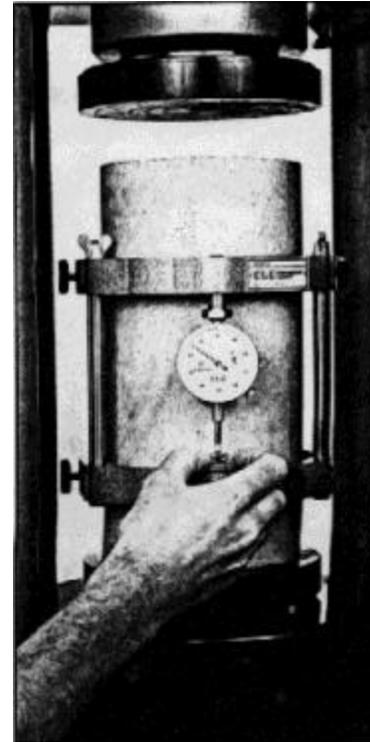
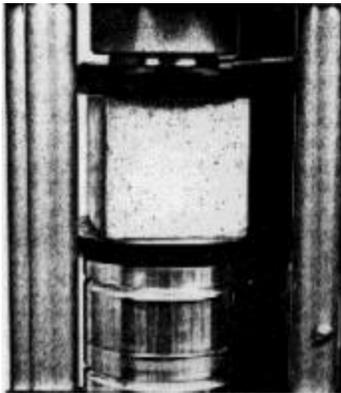


Figura 17. Esquema de Ensayo

➤ *Cálculo de la Resistencia a Compresión*

$$f_c = \frac{P}{S} \text{ kgf / cm}^2$$

siendo: P = Carga máxima en kgf
S = Superficie promedio de la probeta en cm²

Figura 18. Medición mecánica y digital de la carga

➤ Factores o Condiciones a Considerar en el Ensayo

Forma y dimensiones de la probeta:

$$\text{IDIEM:} \quad \begin{array}{ll} R_{\text{cil}} = 0,86 \cdot R_{\text{cub}} & R_{\text{cub}} < 400 \text{ kg/cm}^2 \\ R_{\text{cil}} = 0,48 \cdot R_{\text{cub}} + 152 & R_{\text{cub}} > 400 \text{ kg/cm}^2 \end{array}$$

Gráficos de Price y Hutchison

Condiciones de ejecución del ensayo: [NCh 1037]

- Equipo de ensayo
- Velocidad y dirección de aplicación de la carga
- Tamaño de la probeta en relación al tamaño del árido
- Estado de las superficies de la probeta
- Centrado de la carga de ensayo
- Humedad del material
- Tipo de rotura

Características del hormigón:

$$\text{BOLOMEY:} \quad R = K \left(\frac{C}{W} - 0,50 \right) \quad \begin{array}{l} K_{\text{CC}} = 240 \\ K_{\text{CAR}} = 290 \end{array}$$

- Tipo de cemento
- Razón Agua/Cemento y Grado de Compactación
- Edad del hormigón
- Razón árido/cemento
- Árido: granulometría, textura superficial, forma, resistencia y rigidez
- Tamaño máximo del árido

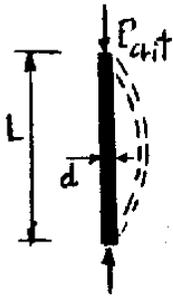
Condiciones ambientales: [Manual Hormigón USBR]

- Humedad
- Temperatura

• FORMA Y DIMENSIONES DE LA PROBETA

➤ Dimensiones de la Probeta

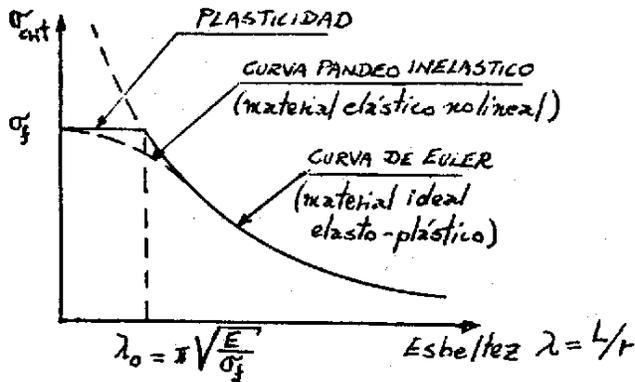
INESTABILIDAD LATERAL (PANDEO)



Carga crítica o de pandeo: Máxima carga que es posible aplicar a una columna perfecta sin riesgo que se flecte lateralmente por flexión.

$$P_{crit} = \frac{\pi^2 EI}{L^2} \text{ con } I = \int_0^h y^2 dA : \text{ momento de inercia (cm}^4\text{)}$$

$$\sigma_{crit} = \frac{P_{crit}}{A} = \frac{\pi^2 E}{\left(\frac{L}{r}\right)^2} \text{ con } r = \sqrt{\frac{I}{A}} : \text{ radio de giro de la sección (cm)}$$

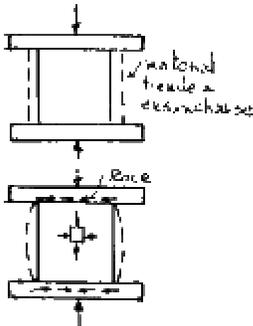


Se evita pandeo si esbeltez

$$\lambda = L/d \ll 8$$

(cualquier excentricidad disminuye este valor)

EFEECTO DE BORDE :



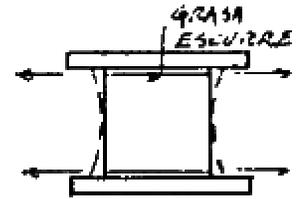
Placa de carga restringe la expansión lateral del hormigón, debido a que la deformación lateral del acero es pequeña en comparación con la del hormigón ($E_{acero} \approx 10 E_{hormigón}$ y $\nu \approx$ igual)

Roce que se desarrolla produce presión hidrostática la que confina el material → APARENTA MAYOR RESISTENCIA

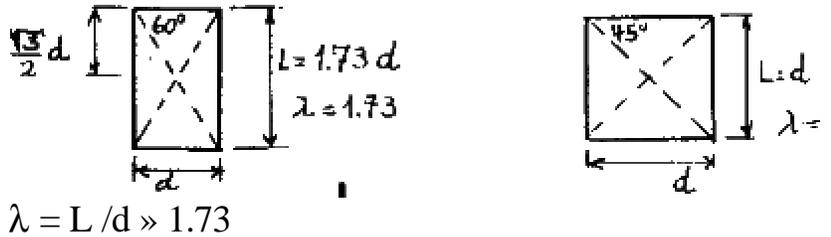
En materiales dúctiles produce deformación tipo barril.

Soluciones :

- a) Lubricar las caras de contacto: ¡¡MALO!!
 El escurrimiento radial del lubricante hacia el exterior debilita al material
 →REDUCE RESISTENCIA DEL MATERIAL



- b) Por esbeltez



SOLUCIÓN DE COMPROMISO $2 \ll \lambda = L / d \ll 8$

➤ *Factores de Conversión para Probetas Cilíndricas por Esbeltez*

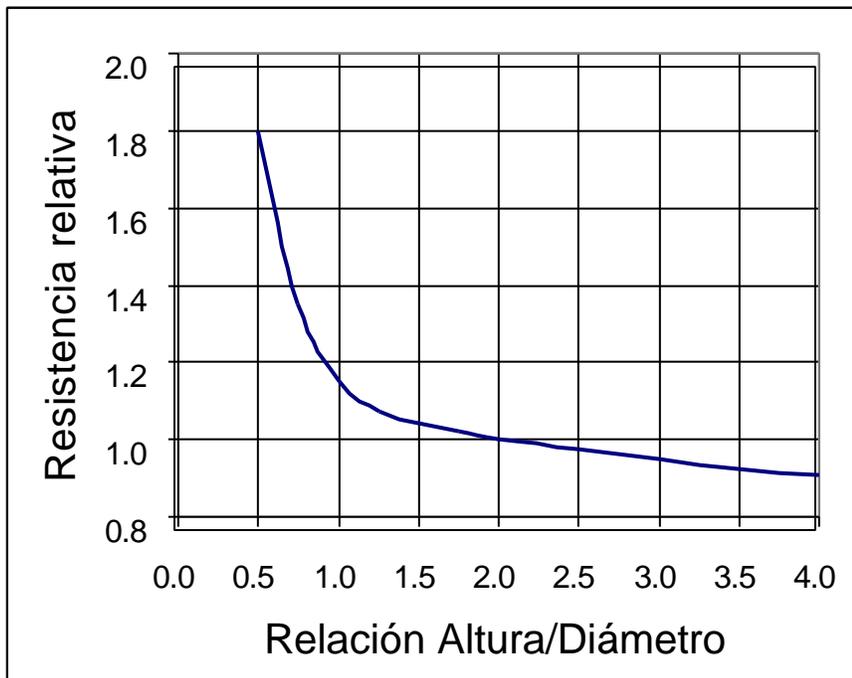


Figura 19. Pauta general de la influencia de la relación altura/diámetro sobre la resistencia de un cilindro.

A MAYOR ESBELTEZ MENOR RESISTENCIA

Resistencia cilíndrica equivalente estimada: f_{cil} (cilindro 150*300)

$$f_{cil} = f_c \times (F.C.) = \text{resistencia cilíndrica corregida}$$

con F.C. = factor de corrección según esbeltez λ del testigo

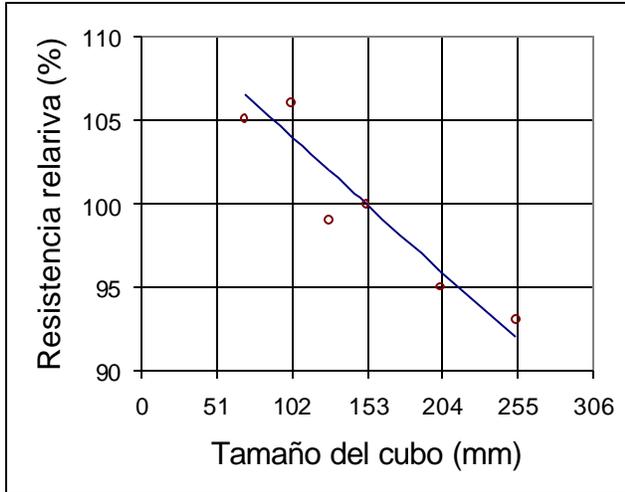
$$\lambda = \text{Esbeltez} = \frac{\text{Altura del testigo con capping}}{\text{Diámetro promedio del testigo}}$$

Factor de corrección (F.C.) por esbeltez

Tabla 2. Factores estándar de corrección para la resistencia de cilindros con diferentes relaciones de altura a diámetro.

Relación de altura a diámetro	Factor de corrección de la resistencia	
	A.S.T.M. C 42-77	B.S. 1881: 1970
2,00	1,00	1,00
1,75	0,98	0,98
1,50	0,96	0,96
1,25	0,93	0,94
1,00	0,87	0,92

➤ **Factores de Conversión para Probetas Diferentes Dimensiones**
Probetas cúbicas



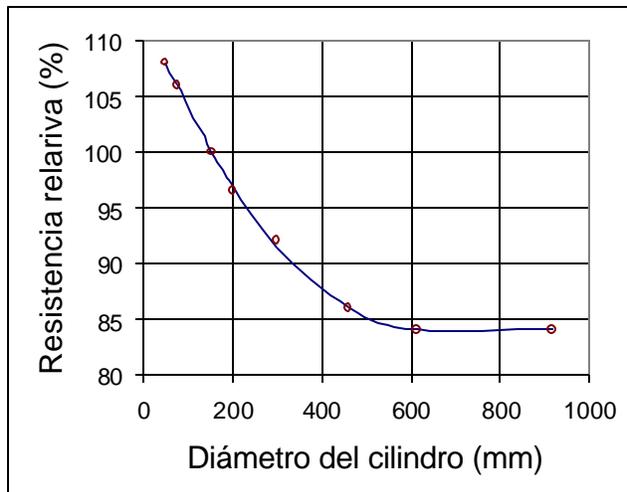
$$R_{\text{cubo } 200} = \frac{R_{\text{cubo } x}}{\phi_{\text{cubo}}}$$

Figura 20. Resistencia a la compresión de cubos de diferentes tamaños

Cubo	100	150	200	250	300
j cubo	1,10	1,05	1,00	0,95	0,90
F.C.20cm	0,90	0,95	1,00	1,05	1,10

A MAYOR TAMAÑO MENOR RESISTENCIA

Probetas cilíndricas



$$R_{\text{cilindro } 150/300} = \frac{R_{\text{cilindro } x/2x}}{\phi_{\text{cil.}}}$$

Figura 21. Resistencia a la compresión de cilindros de diferentes diámetros

Cilindro	100/200	150/300	200/400	250/500	300/600
j cilindro	1,02	1,00	0,97	0,95	0,91

➤ Forma de la Probeta

Probeta cúbica	Probeta cilíndrica	Probeta prismática
100x100 150x150 (UK) 200x200 (Chile)	φ 150 x 300 (USA) (Uso en investigación)	70x70x35 (Francia) 100x100x500 (Francia)

Hasta Tamaño máximo árido = 40 mm

Para D=75 mm, cilindro φ 300 x 450

CUBOS APARENTAN MAYOR RESISTENCIA

➤ Factores de Conversión para Probetas Diferentes Formas

CUBO (150/200) Resistencia a la compresión en:		Factor de conversión φ por forma $R_{\text{cilindro}} = \frac{R_{\text{cubo}}}{\phi}$	CILINDRO (150/300) Resistencia a la compresión en:	
MN/m ²	kgf/cm ²		MN/m ²	kgf/cm ²
5	50	1,25	4	40
10	100	1,25	8	80
15	150	1,25	12	120
20	200	1,25	16	160
25	250	1,25	20	200
30	300	1,20	25	250
35	350	1,17	30	300
40	400	1,14	35	350
45	450	1,13	40	400
50	500	1,11	45	450
55	550	1,10	50	500
60	600	1,09	55	550

RELACIONES NUMÉRICAS

IDIEM:

$$f_{cil} = 0,86 f_{cu}$$

$$\text{para } f_{cu} = 400 \text{ kg/cm}^2$$

$$f_{cil} = 0,48 f_{cu} + 152$$

$$\text{para } f_{cu} > 400 \text{ kg/cm}^2$$

ALEMANA:

$f_{cu} = 1.25 f_{cil}$ para $f_{cil} < 25 \text{ MPa}$

$f_{cu} = 1.18 f_{cil}$ para $f_{cil} = 25 \text{ MPa}$

INGLESA

BSI 1881 : 1970 $f_{cu} = 1.25 f_{cil}$

NORMA CHILENA

$f_{cu} = 1.25 f_{cil}$ para $f_{cu} < 25 \text{ MPa}$

$f_{cu} = 1.25 f_{cil} + 5$ para $f_{cu} = 25 \text{ MPa}$

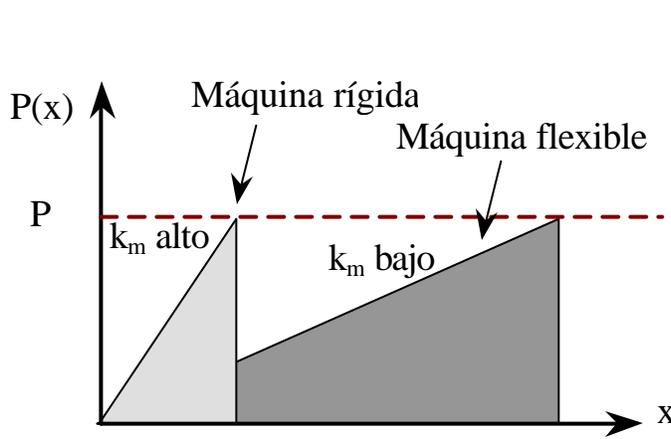
Factores afectados por el grado de resistencia del hormigón

• CONDICIONES DE EJECUCIÓN DEL ENSAYO

► PRECAUCIONES DE EJECUCIÓN

► Equipo de Ensayo

Rigidez de la prensa



$$U = \frac{k_m x^2}{2} = \frac{P^2}{2k_m}$$

Figura 22. Comparación entre la máquina de ensayo rígida y flexible. Las áreas grises representan la energía acumulada a la carga aplicada.

Energía almacenada por la máquina afecta tipo de rotura de la probeta

Prensa más flexible aparenta menor resistencia que la real

Rigidez de los platos de carga

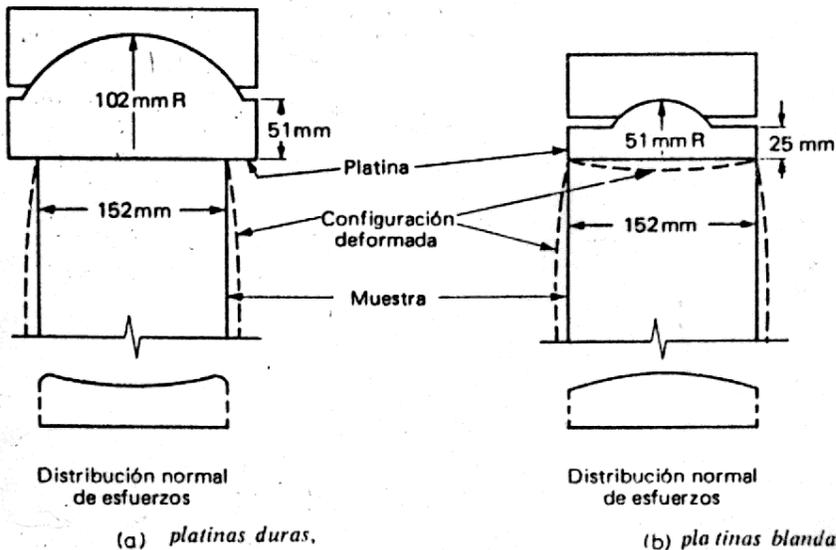


Figura 23. Distribución normal de esfuerzos

➤ **Rótulas y Homogeneidad del Hormigón en su Sección**

a) Posición de ensayo de la probeta

PROBETA CILÍNDRICA	PROBETA CÚBICA	
Posición de ensayo y de fabricación	Posición de fabricación	Posición de ensayo
$E_f > E_s$ $\sigma_f > \sigma_s$ $\sigma_r = \sigma_c$		$\sigma_f > \sigma_s$ $E_f > E_s$

b) Efecto de la rótula de la prensa

Rótula libre Rótula especial cubos
 Tensión constante Deformación constante

Cuando se aplica carga la rótula debe dejar de girar y aplicar ? constante
RÓTULAS NO SE DEBEN ENGRASAR

➤ *Velocidad de Aplicación de la Carga*

Disminución de la rapidez de aplicación de carga reduce resistencia observada

CAUSA: criterio de rotura por deformación límite

ESTÁNDAR: 8 a 20 MN/m²/min

UK: 15 MN/m²/min (2.5 kgf/cm²/s)

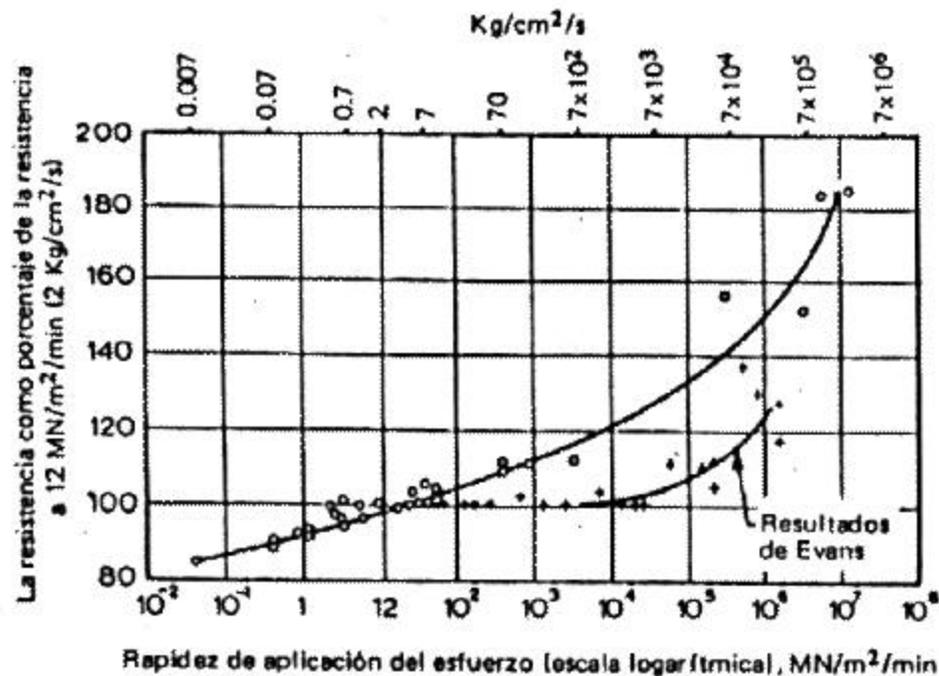


Figura 24. Influencia de la rapidez de aplicación de carga sobre la resistencia a la compresión del concreto

Aplicar la carga en forma continua y sin choques, con velocidad uniforme, cumpliendo las siguientes condiciones:

- alcanzar la rotura en un tiempo igual o superior a 100 segundos
- la velocidad de aplicación de la carga no sea superior a 3,5 kgf/cm²/seg.

➤ *Dirección de Aplicación de la Carga*

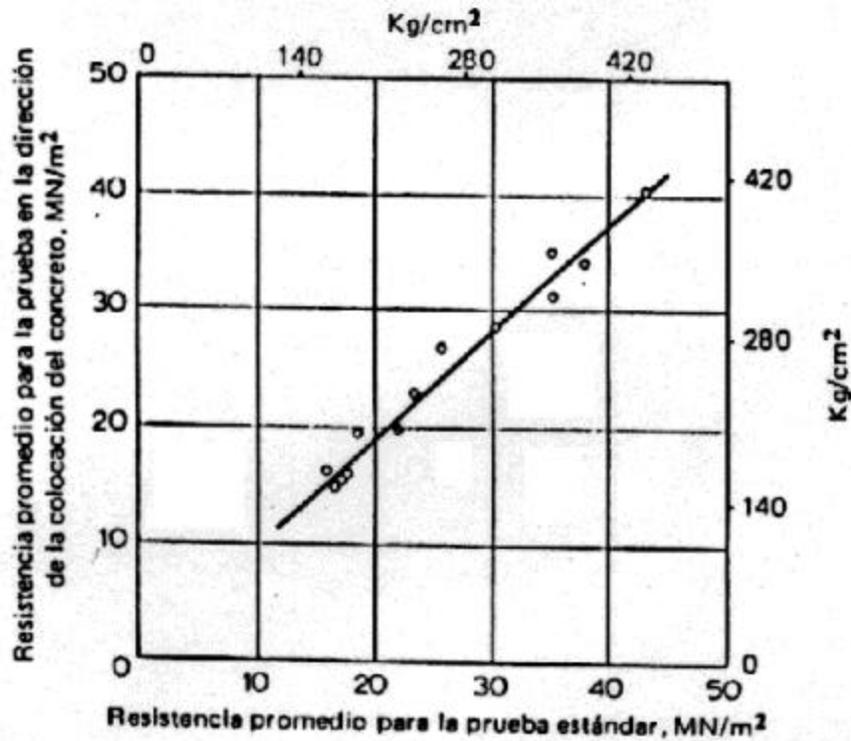


Figura 25. Relación entre la resistencia media de cubos de concreto cargados en la dirección de la colocación del concreto y la resistencia media de la prueba estándar

➤ Estado de las Superficies del Material

Concentración de tensiones por superficie imperfecta reduce la resistencia del hormigón

Condiciones:

- Bases planas (desviación máxima = 0,015 mm)
- Superficies de contacto libres de granos de arena y de residuos
- A escuadra (superficies normales al eje)
- Superficies paralelas entre sí

Preparación de superficies:

- Capping (azufre o cemento puro)
- Pulido por abrasión
- Empacado con otro material. Poco recomendable

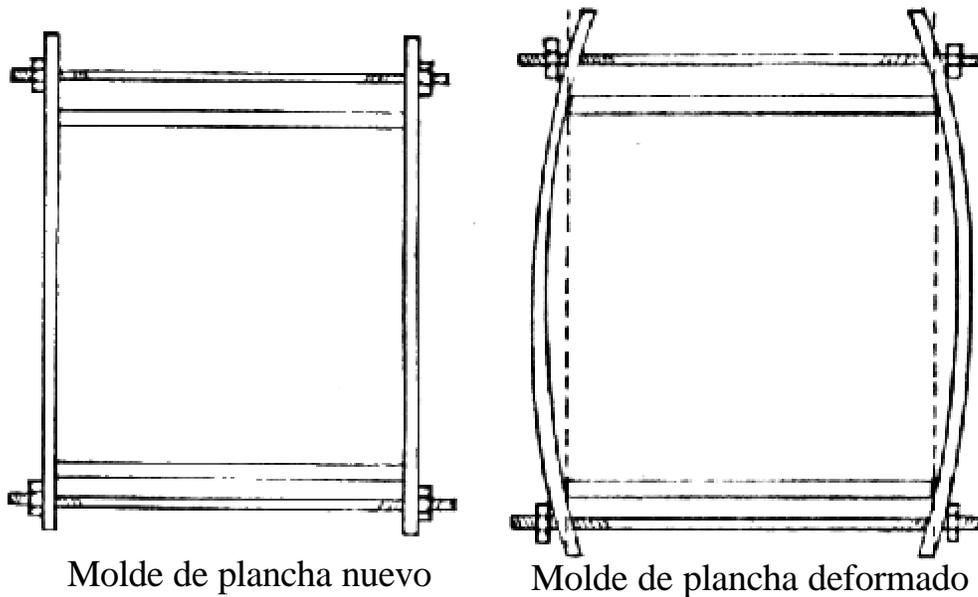
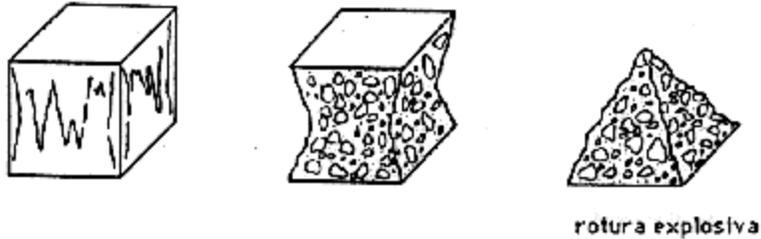


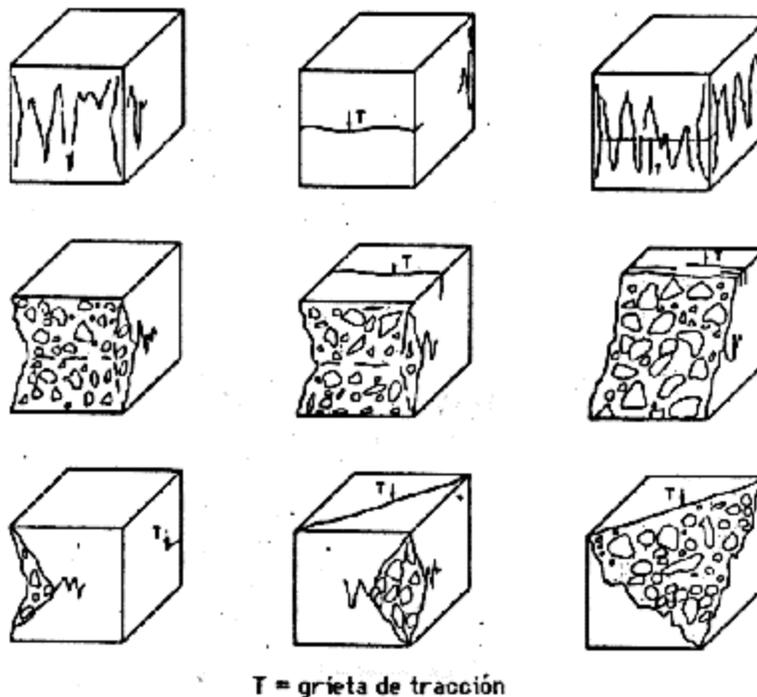
Figura 26. Deformación de moldes cúbicos de plancha.

➤ Tipos de Rotura de Probetas

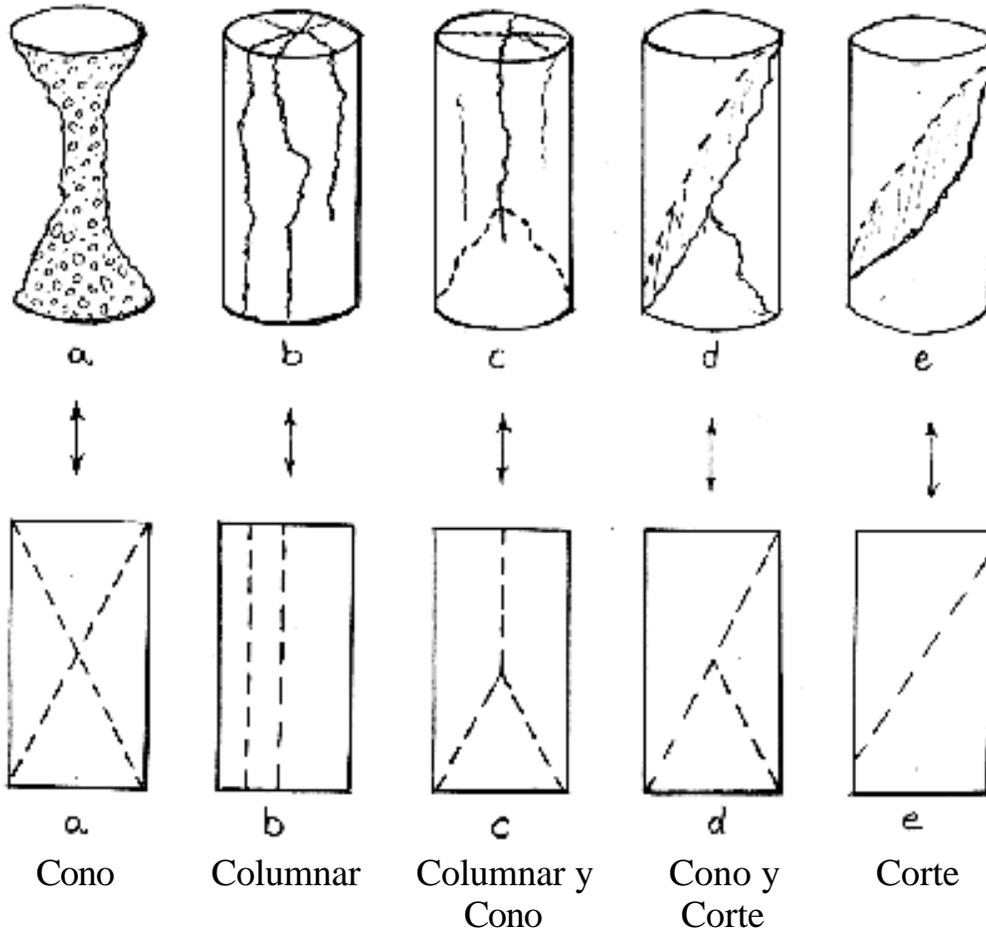
- a) Rotura correcta: agrietamiento similar en las cuatro caras libres, generalmente con un pequeño daño en las caras de carga.



- b) Rotura incorrecta: agrietamiento excesivo en una de las caras o aristas, a veces acompañado por grietas de tracción en una o más caras o en una arista.



TIPOS DE FALLAS EN CILINDROS



Nota: estos tipos de falla no facultan para descartar el ensayo. Sólo pueden ayudar a explicar dispersiones entre resultados en probetas gemelas cuando la falla es del tipo b,c,d ó e.



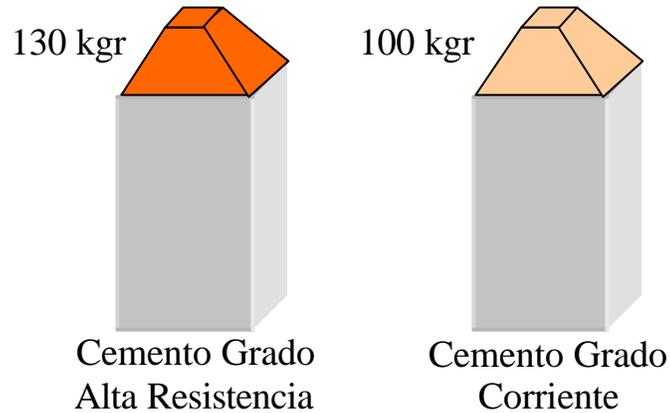
Compresión excéntrica

Falla debido a un procedimiento de ensayo incorrecto.
Este tipo de falla descarta el resultado obtenido para efectos de cálculo de resistencia promedio y otros.

• CARACTERÍSTICAS DEL HORMIGÓN

➤ Tipo de Cemento

Tipo de cemento (Corriente - Alta Resistencia)



Para Hormigones Nacionales

Edad del Hormigón (días)	Relación Cemento Alta Resist/Corriente
7	1,40
28	1,35
90	1,25

Valores varían según procedencia cemento
 Importante para edades < 90 días
 Sobre 6 meses influencia poco significativa

En Mortero Normal

7 días	$R_{CAR} \approx 1,35 R_{CC}$
28 días	$R_{CAR} \approx 1,25 R_{CC}$
90 días	$R_{CAR} \approx 1,15 R_{CC}$

$$R_{\text{Mortero}} \approx R_{\text{Hormigón cubo } 20 \times 1,12}$$

Hormigón con aire incorporado

Hormigón sin aire incorporado

Figura 28. Influencia de la razón Agua/Cemento, edad de curado, tipo de cemento, y aire incorporado en la Resistencia del Hormigón. [*DESIGN AND CONTROL OF CONCRETE MIXTURES, 11 TH EDITION, PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, S KOKIE, ILL., 1968, P.44*]

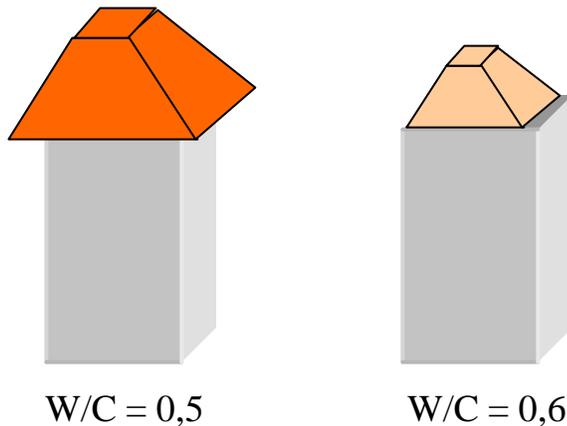
➤ Razón Agua/Cemento y Grado de Compactación

Para un hormigón perfectamente compactado, empleando buenos áridos y un cemento dado, la resistencia depende solamente de la razón agua/cemento. Dicha ley tiene una fórmula de tipo logarítmico:

$$R = \frac{A}{B^x}$$

donde x = razón w/c en volumen absoluto

A, B son coeficientes numéricos que dependen de cada elemento.



Existen numerosas investigaciones que ligan ambos parámetros:

FERET (1896):

$$R = k \frac{1}{\left(1 + \frac{w}{C}\right)^2}$$

k = coeficiente → edad, tipo cemento

w/c = razón agua/cemento en volumen absoluto

BOLOMEY:

$$R = K \left(\frac{C}{W} - 0,50 \right)$$

C/W: razón cemento /agua en peso

K : coeficiente → edad, tipo cemento

Para cementos nacionales, ensayos 28 días y cubos de 20 cm

$K_{28} = 240$ Cemento Corriente

$K_{28} = 290$ Cemento Alta Resistencia

NCh 170 Of. 85:

$R_{28} = 228(C/W - 0,73)$ Cemento grado corriente

$R_{28} = 285(C/W - 0,73)$ Cemento grado alta resistencia

DICTUC:

Cemento Grado Corriente

Resistencia en cubos de 15 cm

$$R_1 = 170(C/W - 1,34)$$

$$R_3 = 217(C/W - 1,18)$$

$$R_7 = 250(C/W - 1,04)$$

$$R_{28} = 250(C/W - 0,74)$$

$$R_{90} = 312(C/W - 0,68)$$

$$R_{180} = 312(C/W - 0,60)$$

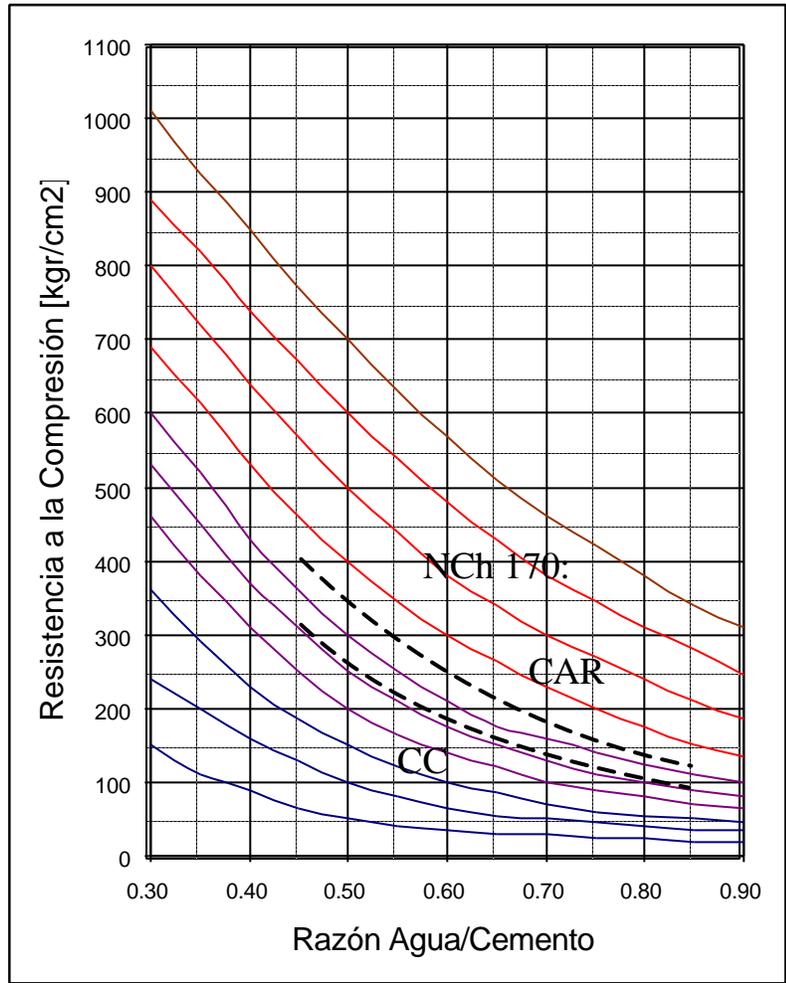


Figura 29. Relación entre la Resistencia a la Compresión y la Razón Agua/Cemento

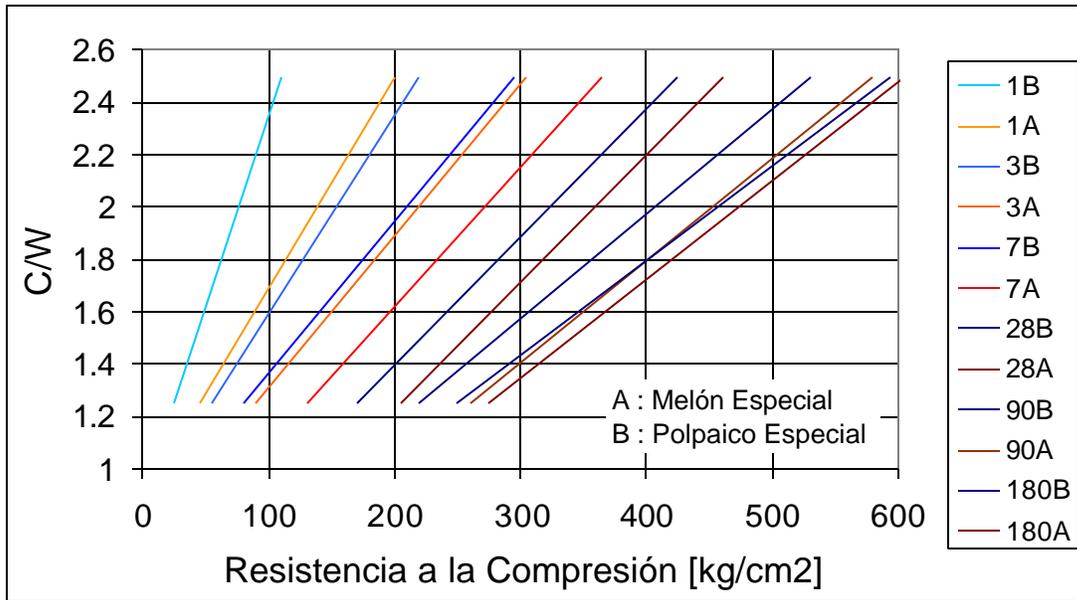


Figura 30. Curva de Resistencia versus razón Agua/Cemento

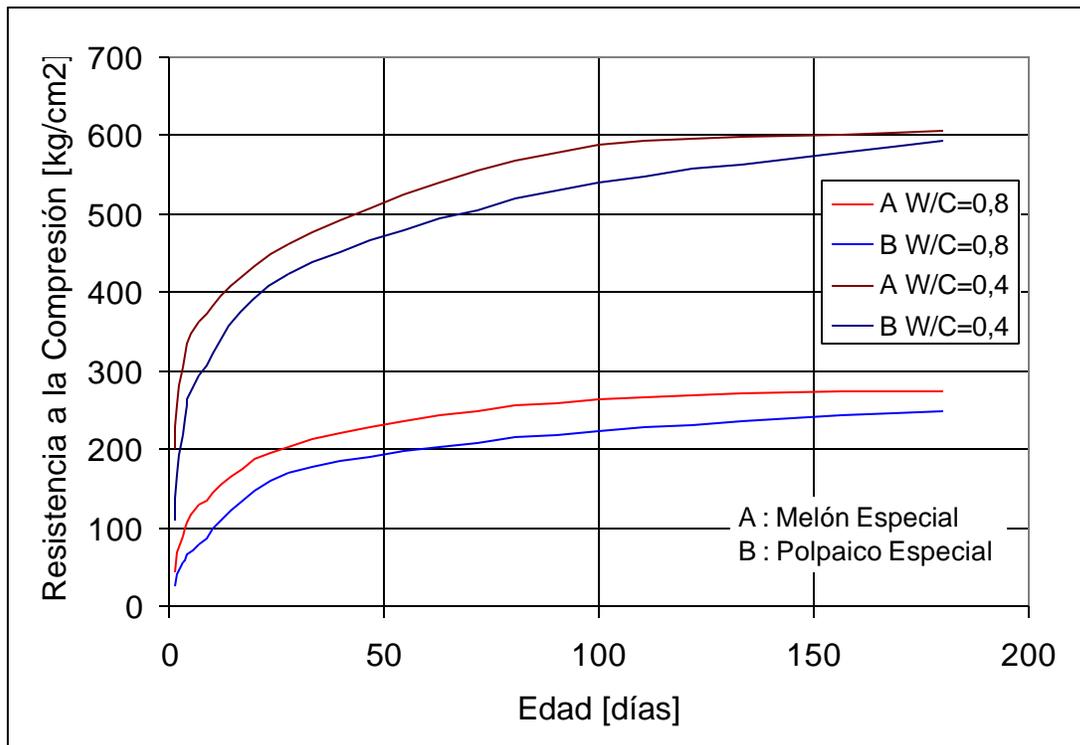


Figura 31. Desarrollo de la resistencia con la edad

Tabla 3. Constantes y Correlación para Ecuación : $\frac{C}{W} = c \cdot R_t + d$

con: R_t : Resistencia a t días (kg/cm^2)
 c y d : constantes

Cemento	Edad	n	r	c	d
Melón Especial	180	5	0,987	0,0033	0,51
	90	5	0,993	0,0033	0,58
	28	5	0,995	0,0040	0,64
	7	5	0,993	0,0045	0,84
	3	5	0,982	0,0051	0,94
	1	5	0,952	0,0070	1,10
Polpaico Especial	180	5	0,981	0,0031	0,66
	90	5	0,992	0,0034	0,68
	28	5	0,990	0,0041	0,75
	7	5	0,962	0,0050	1,01
	3	5	0,982	0,0067	1,05
	1	5	0,975	0,0130	1,08
Ambos	180	10	0,978	0,0032	0,60
	90	10	0,971	0,0032	0,68
	28	10	0,974	0,0040	0,74
	7	10	0,914	0,0040	1,04
	3	10	0,873	0,0046	1,18
	1	10	0,777	0,0059	1,34

➤ Razón Árido/Cemento

Con una razón agua/cemento constante, una mezcla más pobre da mayor resistencia

Causa:

- Volumen total de huecos y poros en el hormigón
- Menor proporción de pasta con respecto volumen del hormigón
- ? menor porosidad total del hormigón ? Mayor resistencia

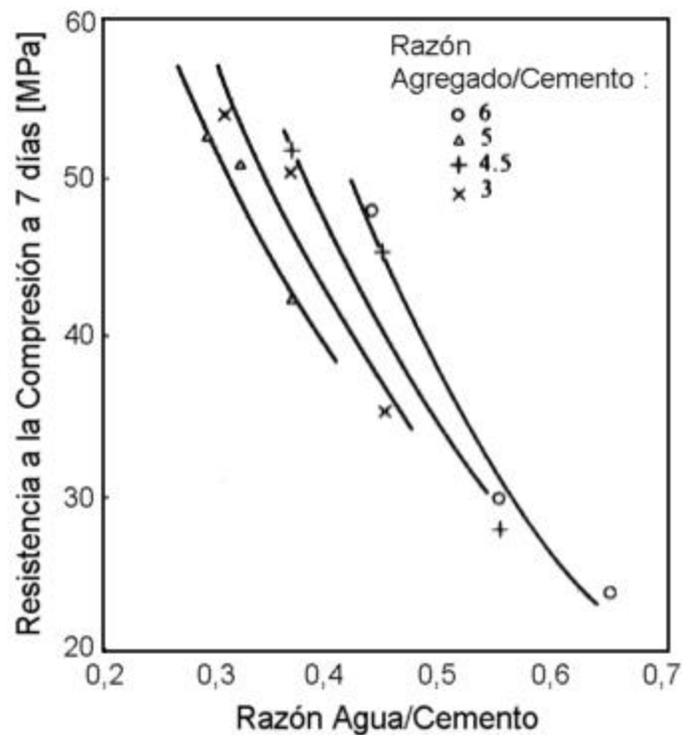


Figura 32. Influencia de la razón Agregado/Cemento en la resistencia a la compresión. [B.G.SINGH, "SPECIFIC SURFACE OF AGGREGATES RELATED TO COMPRESSIVE AND FLEXURAL STRENGTH OF CONCRETE", J.AMER.CONCR.INT., 54, PP. 897-907 (APRIL 1958)]

➤ Tipo de Árido

Tabla 4. Resistencia a la compresión aproximada de mezclas de hormigón hechas con una razón Agua/Cemento de 0,5 de acuerdo al método Inglés de 1988.

Tipo de Cemento Portland	Tipo de Agregado	Resistencia a la compresión [MPa] a la edad de [días]:			
		3	7	28	90
Tipo I : Corriente. Tipo V : Resistente a Sulfatos	Rodado	22	30	42	49
	Chancado	27	36	49	56
Tipo III : de Rápido Endurecimiento	Rodado	29	37	48	54
	Chancado	34	43	55	61

➤ Tamaño Máximo del Árido

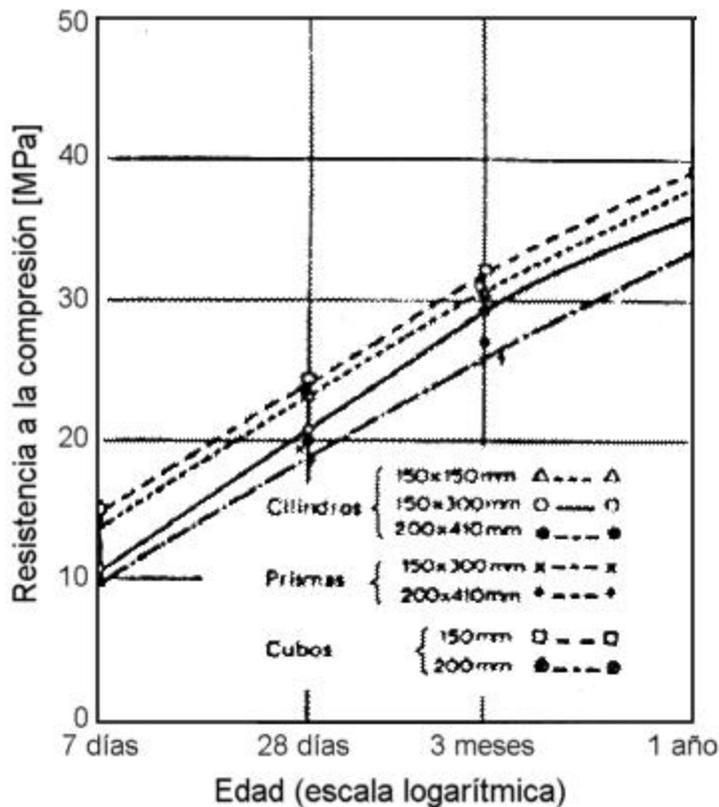


Figura 33. Efecto de la edad sobre la resistencia a la compresión de muestras de diferentes formas y tamaños (mezcla 1:5 en volumen)

➤ Edad del Hormigón

ROSS:

$$R_t = R_{28} \frac{a \cdot t^{2/3}}{b + t^{2/3}}$$

Vialidad:

$$a = 1,4$$

$$b = 3,69$$

Dictuc:

Tabla 5. Constantes para ecuación : $R_t = R_{28} \frac{a \cdot t^{2/3}}{b + t^{2/3}}$

Cemento	W/C	a	b
Melón Especial	0,4	1,43	3,93
	0,5	1,50	4,52
	0,6	1,52	4,83
	0,7	1,64	5,88
Polpaico Especial	0,4	1,55	NIL
	0,5	1,76	7,02
	0,6	1,59	5,46
	0,7	1,81	7,49

VENUAT:

$$R_t = K_1 + K_2 \cdot \log_{10}(t)$$

t : tiempo o edad, expresado en días

Cemento	K ₁	K ₂
Corriente	240(C/W-1,70)	200
Alta Resistencia	290(C/W-1,55)	215

Supone : $R_{28} - R_7 = 120 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ para cemento corriente
 $R_{28} - R_7 = 120 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$ para cemento alta resistencia

HUMMEL:

$$R_t = a \cdot \log_{10}(t) + b = R_{28}(c \cdot \log_{10}(t) + d)$$

con: R_t : resistencia a t días (kg/cm^2)

t : tiempo en días

a,b,c,d : constantes

Tabla 6. Constantes y correlación para ecuación de Hummel (1966)

Coefficientes:	c	d	W/C	Cemento
Hummel	0,66	0,004		
Papadakis	0,30	0,37		
Dictuc (1983)	0,46	1,52	0,5	Melón
	0,46	1,50	0,6	Especial
	0,55	1,25	0,5	Polpaico
	0,57	1,21	0,6	Especial

Nomenclatura Serie	a	b	Coefficiente de correlación
Polpaico w/c = 0,5	212,01	93,57	0,995
Polpaico w/c = 0,6	138,89	64,79	0,989
Melón w/c = 0,5	177,33	198,53	0,983
Melón w/c = 0,6	149,81	91,48	0,998

Dictuc (1983):

Cemento	W/C	n	r	a	b
Melón Especial	0,4	6	0,995	178	218
	0,5	6	0,995	150	111
	0,6	6	0,998	116	84
	0,7	6	0,999	101	62
	Todas	24	0,747	136	119
Polpaico Especial	0,4	6	0,999	209	118
	0,5	6	0,999	174	63
	0,6	6	0,997	125	38
	0,7	6	0,998	104	28
	Todas	24	0,810	153	62
Ambos	0,4	12	0,974	194	168
	0,5	12	0,992	162	87
	0,6	12	0,980	121	61
	0,7	12	0,981	102	45
	Todas	48	0,773	145	90

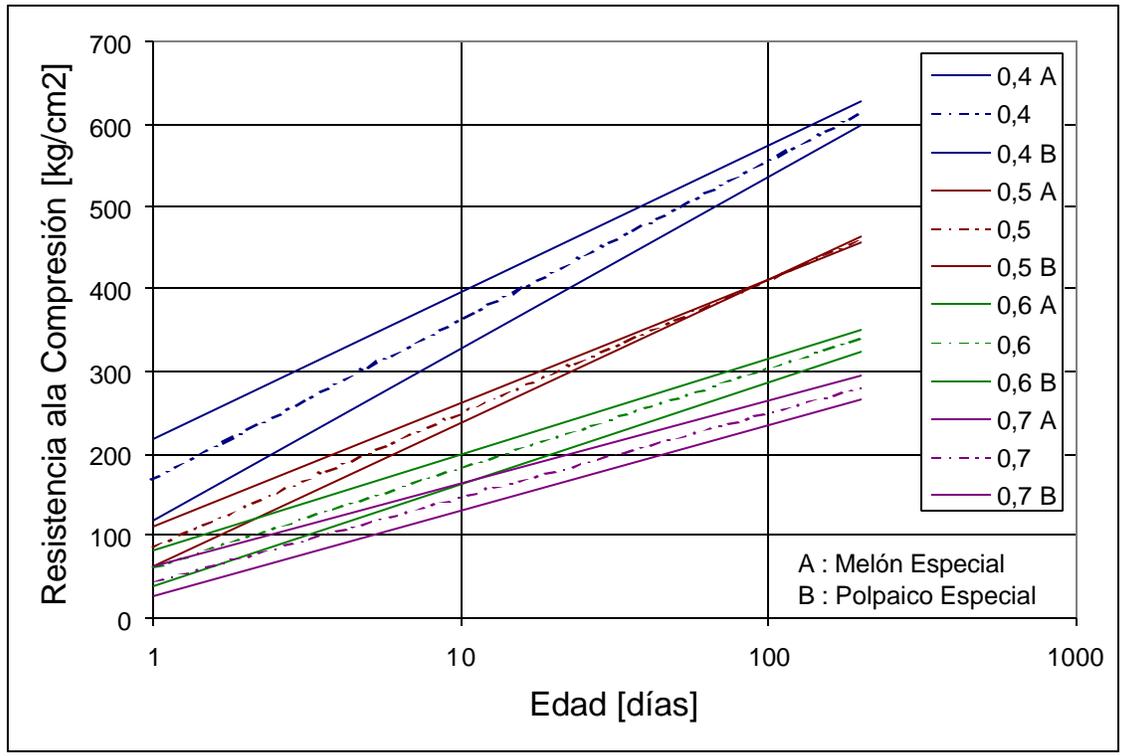


Figura 34. Curvas Resistencia versus Edad

FORMULA PROPUESTA:

$$R_t = A + B \cdot (\log_{10}(t))^C$$

Nomenclatura Serie	A	B	C	Coefficiente de correlación
P5 Polpaico w/c = 0,5	106,00	192,84	1,27822	0,999
P6 Polpaico w/c = 0,6	71,00	132,27	1,23936	0,998
M5 Melón w/c = 0,5	202,00	170,82	0,92958	0,984
M6 Melón w/c = 0,6	87,00	156,17	0,86393	0,999

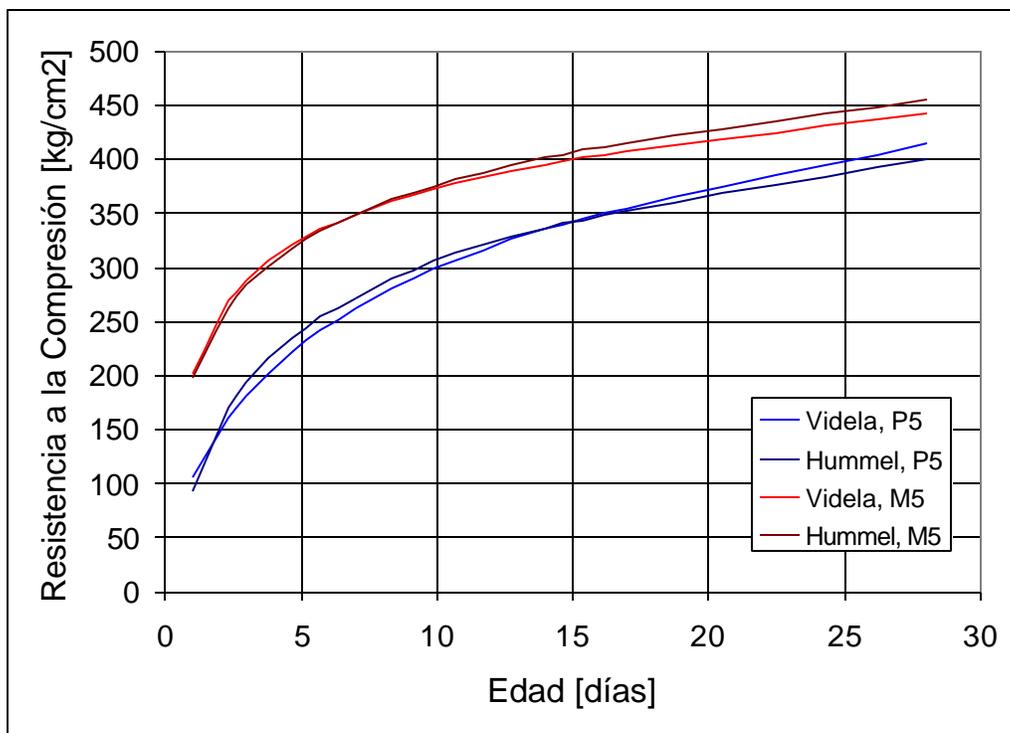


Figura 35. Curvas de evolución de resistencia (Serie P5, M5) con curado normal

Figura 36. Curvas de evolución de resistencia (Serie P6, M6) con curado normal.

• CONDICIONES AMBIENTALES:

En general, las condiciones ambientales, a las cuales está sometido el hormigón durante su vida útil, ejrcen una influencia importante sobre su resistencia y, en particular, sobre su resistencia a la compresión.

Curado: temperatura + humedad

➤ *Humedad del Material*

En general, los materiales secos aparentan mayor resistencia que materiales saturados.

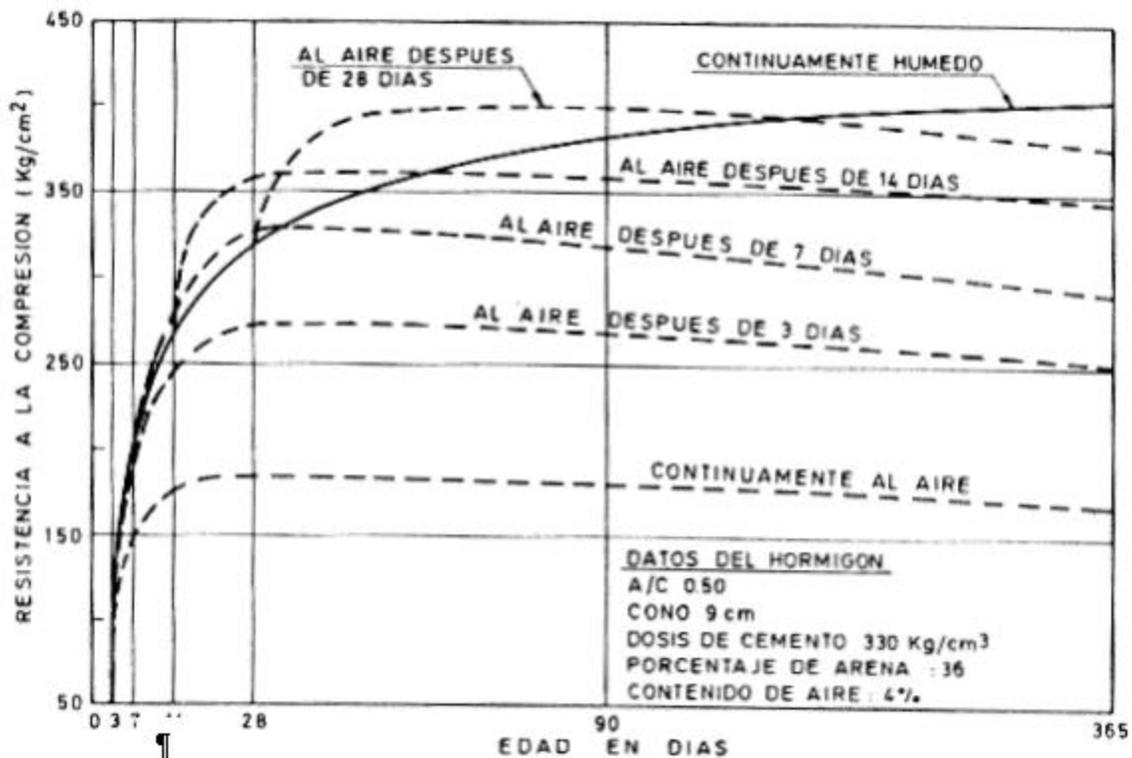


Figura 37. Influencia de la humedad ambiental sobre la resistencia.

Referencia de carácter cualitativo: Estas curvas fueron estudiadas para hormigones elaborados con cemento tipo Portland, motivo por el cual no son extrapolables a las condiciones de los cementos nacionales. De todas maneras, la importancia de aquellas es que permite observar la necesidad de efectuar un debido curado del hormigón en sus primeros días.

Tabla 7. Período de curado aproximado necesario para producir el grado de hidratación en que los capilares se segmenten

Razón W/C - masa	Grado de hidratación (%)	Período de curado necesario
0,40	50	3 días
0,45	60	7 días
0,50	70	14 días
0,60	92	6 meses
0,70	100	1 año
> 0,70	100	imposible

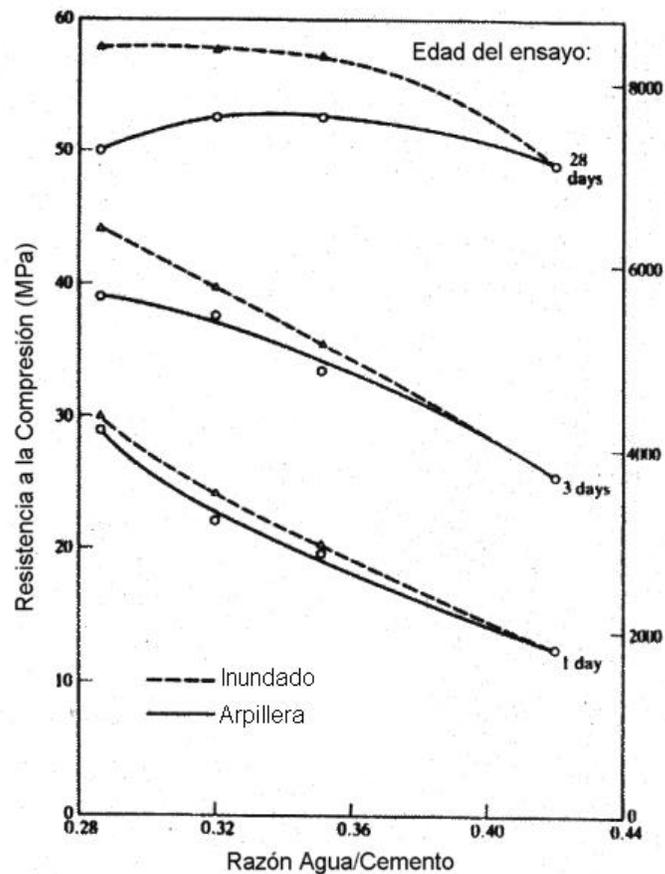


Figura 38. Influencia de las condiciones de curado en la resistencia de probetas cilíndricas.

BS 1881

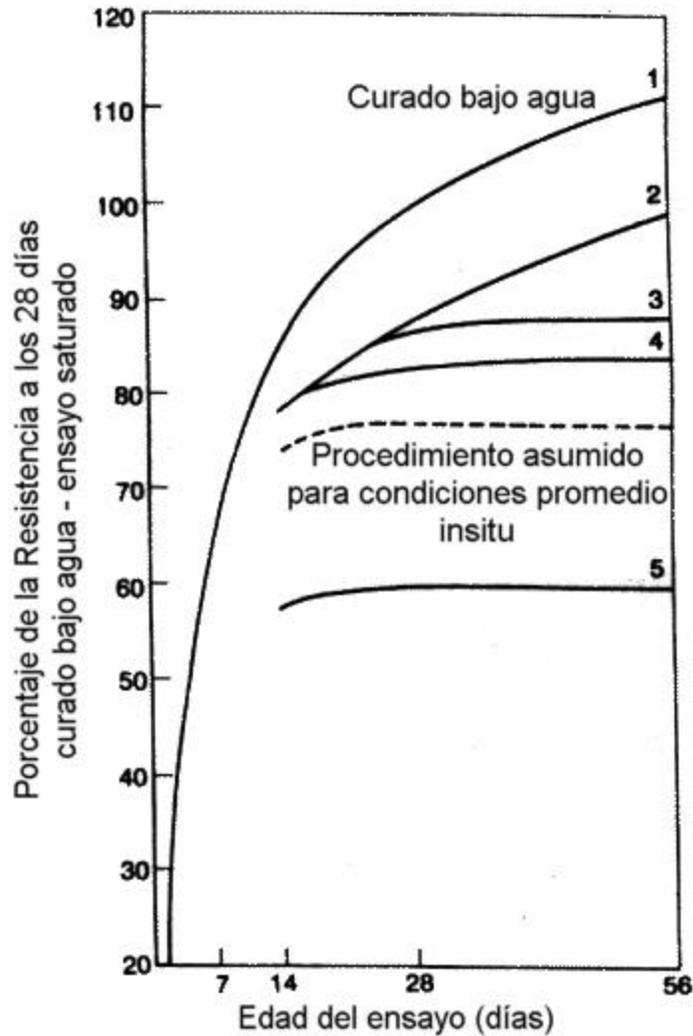


Figura 39. Influencia del curado sobre la resistencia determinada después de curado de 2 días en agua.

- 1 Curado bajo agua (cubos BS 1881)
- 2 Hormigón protegido de toda pérdida de agua
- 3 Hormigón protegido de toda pérdida de agua durante 12 días , luego se dejó curar al aire libre
- 4 Hormigón protegido de toda pérdida de agua durante 5 días , luego se dejó curar al aire libre
- 5 Hormigón curado al aire libre.

* NCh 170

Según la norma chilena NCh170: “El período de protección y curado debe ser por lo menos de 7 días para hormigón con cemento de grado corriente y de 4 días con cemento de grado de alta resistencia.”

Tabla 8. Período mínimo de protección necesario para diferentes cementos y condiciones de curado, según BS 8110: parte 1 1985.

Tipo de cemento	Período mínimo de curado y protección (días) para temperatura de superficie promedio del hormigón:		
	Entre 5 y 10 °C (41 y 50° F)	Sobre 10 °C (50° F)	Entre 5 y 25 °C * (41 y 77° F)
(1) Humedad / desprotegido (humedad relativa > 80 %) protegido del sol y viento Todos los tipos	Sin requerimientos especiales		
(2) Intermedio entre las condiciones (1) y (3)			
Portland común (Tipo I)			
Resistente al sulfato (Tipo V)	4	3	60 / (t+10)
Endurecimiento rápido (Tipo III)			
Otros cementos con o sin escoria	6	4	80 / (t+10)
(3) Seco / desprotegido (humedad relativa < 50 %) desprotegido de sol y viento			
Portland común (Tipo I)			
Resistente al sulfato (Tipo V)	6	4	80 / (t+10)
Endurecimiento rápido (Tipo III)			
Otros cementos con o sin escoria o Cenizas Volantes	10	7	140 / (t+10)

* La fórmula dada puede ser usada para calcular el período mínimo de protección: t es la temperatura en °C

➤ Temperatura del Material

Al analizar las tablas y gráficos existentes, se puede deducir que, en general:

- Los hormigones fabricados en invierno tienen, en promedio, una mayor resistencia que los construidos en el verano.
- Una mayor temperatura al momento del ensayo conduce a una menor resistencia registrada.

Efecto de la temperatura durante los primeros 28 días en la resistencia:

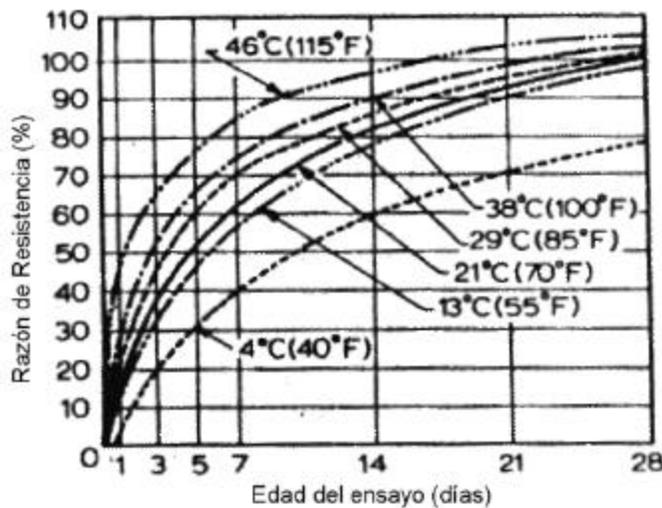


Figura 40. Razón de Resistencia entre el hormigón curado a diferentes temperaturas y la resistencia a 28 días del hormigón curado a 21°C (70°F) (Razón W/C=0,50; las muestras fueron moldeadas, selladas y curadas a la temperatura indicada)

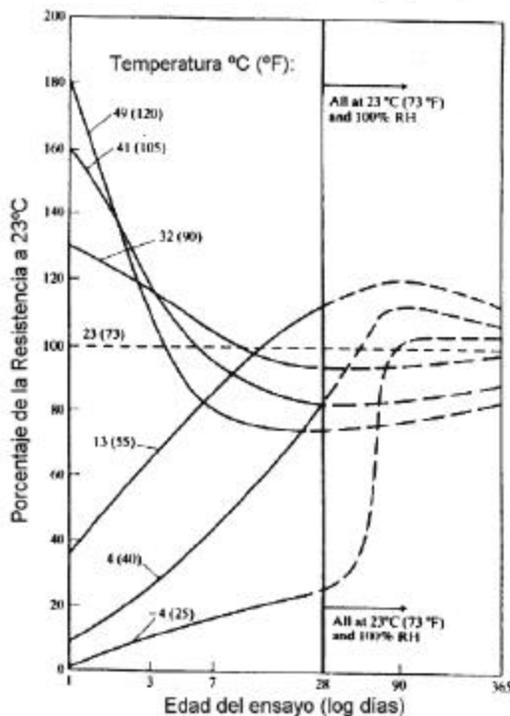


Figura 41. Efecto de la temperatura durante los primeros 28 días en la resistencia del hormigón (Razón W/C=0,41; contenido de aire = 4,5%; cemento Portland corriente)

Efecto de la temperatura durante las primeras horas:

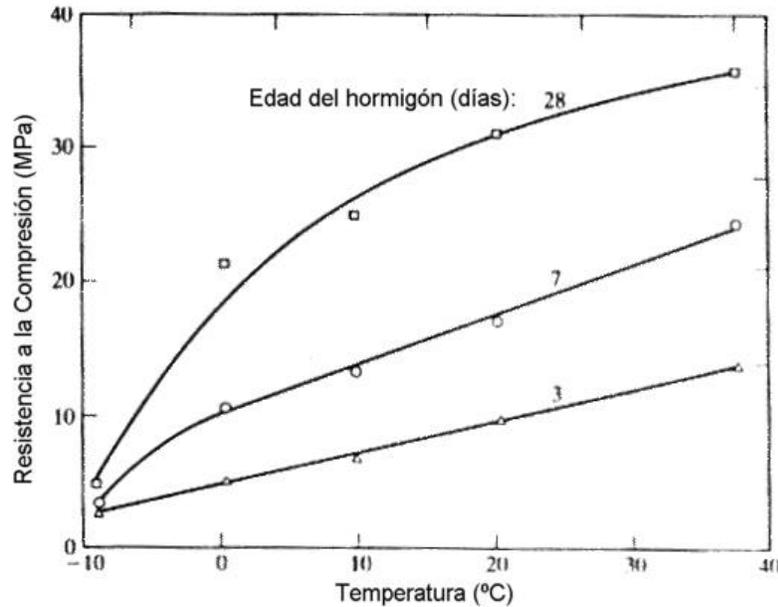


Figura 42. Influencia de la temperatura de curado en la resistencia de un hormigón curado a 10°C durante sus primeras 24 horas para luego ser dejado a la temperatura indicada

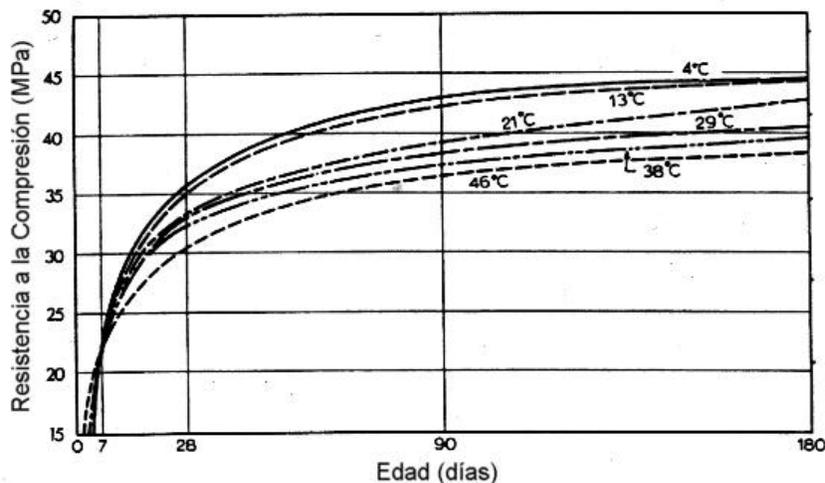


Figura 43. Efecto de la temperatura durante las primeras dos horas después de la colocación del concreto en el desarrollo de la resistencia. (Todas las muestras fueron selladas y después de 2 horas curadas a 21 °C).

Efecto de la temperatura al momento de ensayo

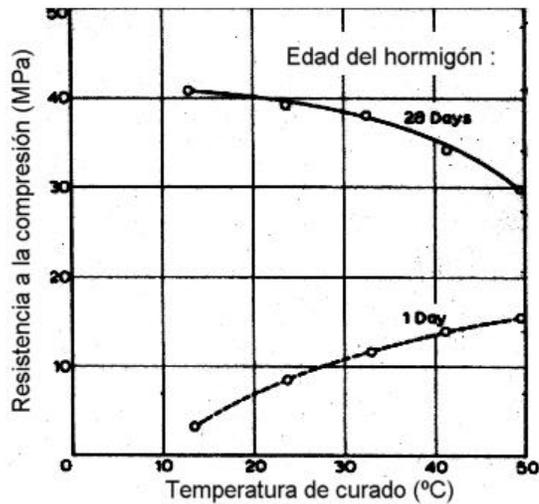


Figura 44. Influencia de la temperatura en la resistencia a la compresión a 1 y 28 días (probetas ensayadas después de enfriar a 23 °C durante un período de dos horas)

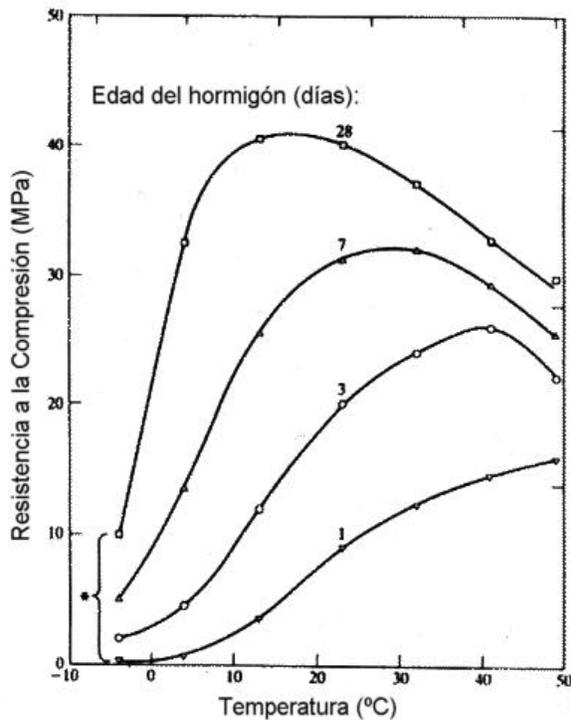


Figura 45. Influencia de la temperatura en la resistencia del hormigón moldeado y curado a la temperatura indicada (* Hormigón moldeado a 4 °C y curado a -4 °C hasta la edad de 1 día)

Efecto del tiempo de curado al momento de ensayo

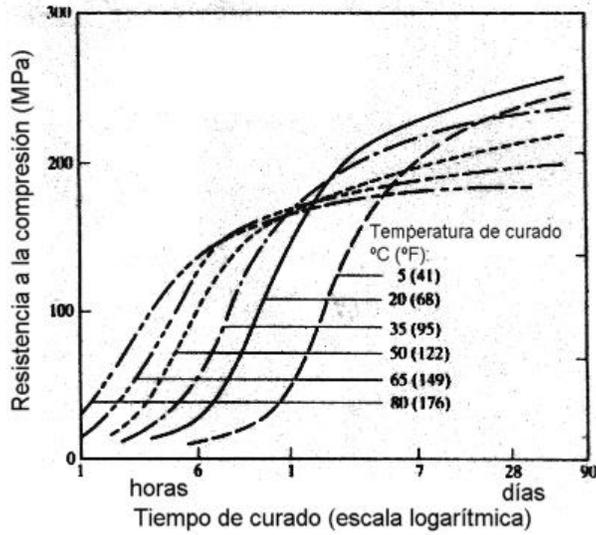


Figura 46. Relación entre la resistencia ala compresión y el tiempo de curado de pasta de cemento pura compactada a diferentes temperaturas de curado.

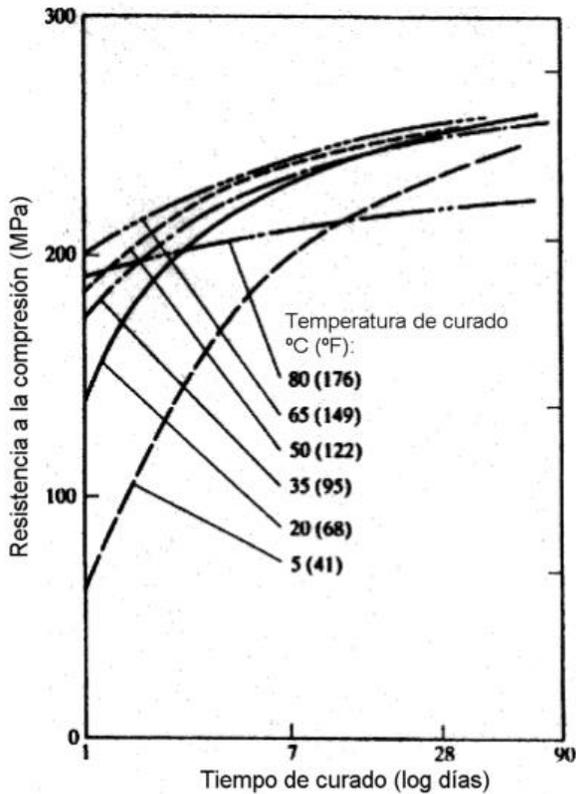


Figura 47. Relación entre la resistencia a la compresión y el tiempo de curado de pasta de cemento pura compactada a diferentes temperaturas de curado.

• CONCEPTO DE MADUREZ

Consideraciones teóricas

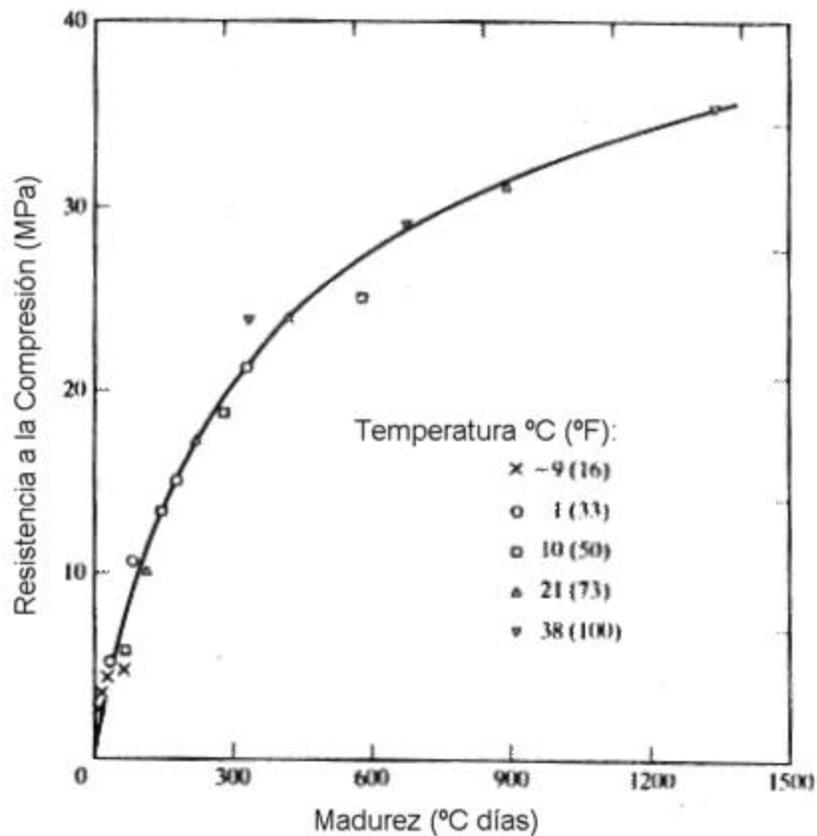
Debido a que la temperatura de curado afecta significativamente el grado de resistencia alcanzado por el hormigón, se ha intentado relacionar el efecto combinado del tiempo y la temperatura a los cuales el hormigón desarrolla su resistencia. Este efecto combinado da origen al término madurez (M), definido por:

$$M = \int (T - T_0) dt$$

donde:

T : Temperatura del hormigón en un período de tiempo dado dt

T₀ : Temperatura de referencia, entendiéndose como tal aquella a la cual la resistencia del hormigón permanece constante. Se han propuesto diversos valores para T₀, sin embargo se acepta como recomendable tomar un valor entre -12 °C y -10 °C.



IGUAL MADUREZ = IGUAL RESISTENCIA

La ecuación a largo plazo es: [SAUL,NURSE]

$$M = \sum_{i=1}^n t_i \cdot (T_i + 10)$$

siendo:

M : madurez del hormigón

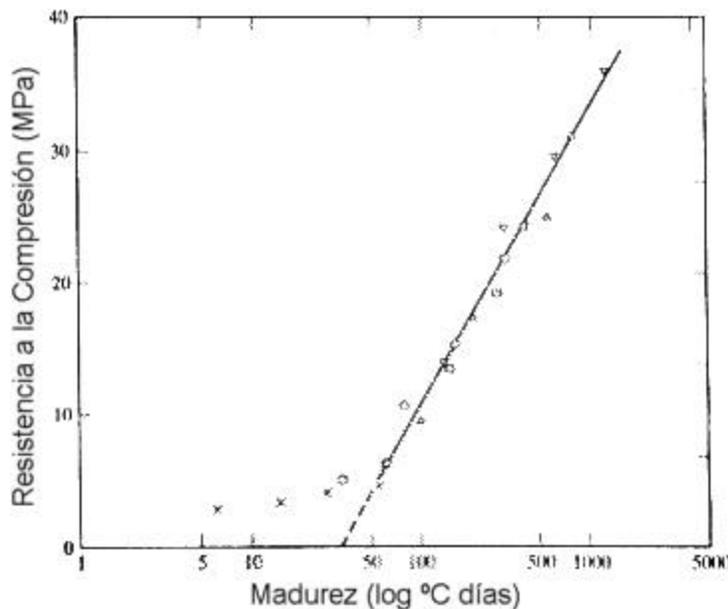
T_i : temperatura del hormigón (°C)

t_i : tiempo de mantención de la temperatura T_i

Es importante establecer la relación resistencia - madurez para cada hormigón específico.

A partir del concepto de madurez antes definido, la ecuación normalmente sugerida para predecir la resistencia potencial R(M) de un hormigón para una madurez dada, queda definida por medio de la siguiente relación:

$$R(M) = A + B \cdot \log(M)$$



Si el curado del hormigón se hace a una temperatura constante, la ecuación toma la forma:

$$R(M) = A + B \cdot \log(T - T_0) + B \cdot \log(t)$$

donde A, B, corresponden a constantes que se deben determinar para cada hormigón específico, ya que depende del grado de resistencia del hormigón. Se debe tener en cuenta que estas constantes dependen de una diversidad de factores, entre los cuales se puede mencionar, como los más relevantes, los siguientes: el tipo de cemento, la razón W/C y la relación cemento / áridos.

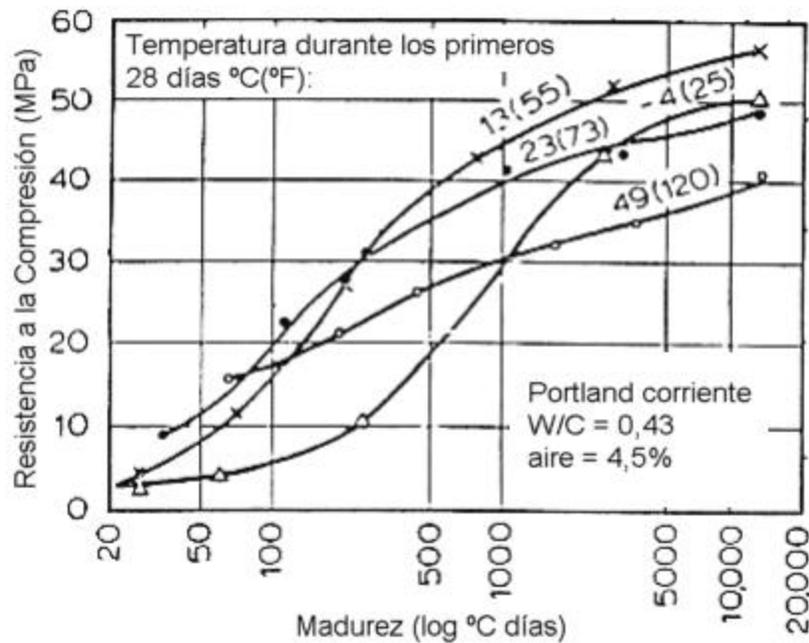


Figura 48. La influencia de la temperatura en la madurez del hormigón.

- ✓ La relación resistencia - madurez depende de:
 - las propiedades del cemento y
 - la calidad del hormigón.
- ✓ La relación es válida sólo dentro de un rango de temperatura.
- ✓ La relación es bastante buena cuando la temperatura inicial del hormigón es entre 16 y 27 °C.

Lo anteriormente expuesto implicaría que, en rigor, las relaciones determinadas para una dosificación dada sólo permitirían estimar la resistencia de otro hormigón igual al anterior al que se le conoce su madurez, cuando la temperatura inicial del hormigón está entre los 16 y los 27 °C y no se produce pérdida de humedad durante el período considerado. Basado en esta teoría A.S.T.M. proporciona un método para estimar la resistencia potencial de un

hormigón $R(t)$, a una edad posterior o intermedia de ensayo por medio de la siguiente ecuación [ASTM C 918 – 80]:

$$R(t) = R(t_0) + B \cdot [\log(M(t)) - \log(m(t_0))]$$

donde:

$R(t)$: Resistencia potencial del hormigón al tiempo t

$M(t)$: Madurez del hormigón al tiempo t (en $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$)

$m(t_0)$: Madurez del hormigón al tiempo t_0 (en $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$)

$R(t_0)$: Resistencia potencial del hormigón al tiempo t_0 .

Para determinar el valor de la constante “B” se deben ensayar probetas a 24 hrs. 3, 7, 14 y 28 días y a las cuales se les calcula su madurez en $^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}$. Con estos resultados se grafica en papel semilogarítmico la curva resistencia v/s madurez; la pendiente de la recta resultante corresponde al valor de la constante “B” (ver figura a continuación). De tal forma que, calculando “B” y teniendo los valores de $R(t_0)$ y $m(t_0)$ para un tiempo dado (el que puede corresponder a 24 hrs.), queda determinada la ecuación $R(t)$ para ese hormigón.



Figura 49. Curva de resistencia versus madurez

La madurez se podría asumir lineal a largo plazo. A corto plazo la relación no es lineal y existen otras ecuaciones de madurez como la de Sadgrove y Voellmy, que definen el incremento de madurez sobre 20°C .

Básicamente, el procedimiento consiste en determinar el período de tiempo equivalente (t_e), bajo condiciones de curado normalizadas, que es necesario reemplazar en la curva de evolución de resistencia de referencia o normalizada (en general 20°C), para estimar la resistencia del hormigón bajo condiciones de curado en obra.

$$t_e = \sum_{i=1}^n \frac{(T_i - T_0)}{(T_c - T_0)} t_i \sum_{i=1}^n R_{T_i} \cdot t_i$$

en que:

T_i : Temperatura del hormigón en el intervalo de tiempo t_i considerado.

T_c : Temperatura normalizada o de referencia a la cual se desea hacer la equivalencia de tiempo en cuanto a la evolución de resistencia (ej. 20 °C)

t_i : intervalo de tiempo considerado

R_{T_i} : Coeficiente de madurez para la temperatura T_i

por lo tanto:

$$M_{T_c} = t_e \cdot (T_c - T_0)$$

y

$$R(t_e) = A + B \cdot (T_c - T_0) + B \cdot \log(t_e) = K_1 + K_2 \log(t_e)$$

Sadgrove postula que el factor de conversión (R_{T_i}) es de la forma:

$$R_s = \left[\frac{T_i + a(^{\circ}\text{C})}{T_c + a(^{\circ}\text{C})} \right]^2$$

donde:

R_s : coeficiente de conversión de Sadgrove

$a(^{\circ}\text{C})$: es una constante (16 °C según Sadgrove y 28 °C según Voellmy)

Rastrup $R_R = 2^{0,0667(T-20)}$

Sadgrove $R_s = \left[\frac{T+16}{36} \right]^2$

Voellmy $R_v = \left[\frac{T+28}{48} \right]^2$

Saul y Nurse $R_c = \left[\frac{T+10}{30} \right]$

donde:

R_R : Razón de madurez comparado con la a 20 °C, según Rastrup.

R_s : Razón de madurez comparado con la a 20 °C, según Sadgrove.

R_v : Razón de madurez comparado con la a 20 °C, según Voellmy.

R_c : Razón de madurez comparado con la a 20 °C, según Saul y Nurse.

T : Temperatura del hormigón (°C)

A mayor temperatura, la resistencia es mayor a corto plazo y menor a largo plazo, aunque la madurez sea igual. Esto hace necesario contar con ecuaciones de madurez para diferentes temperaturas y diferentes edades del hormigón. Este concepto de madurez es muy útil, pero tiene problemas a temperaturas extremas.

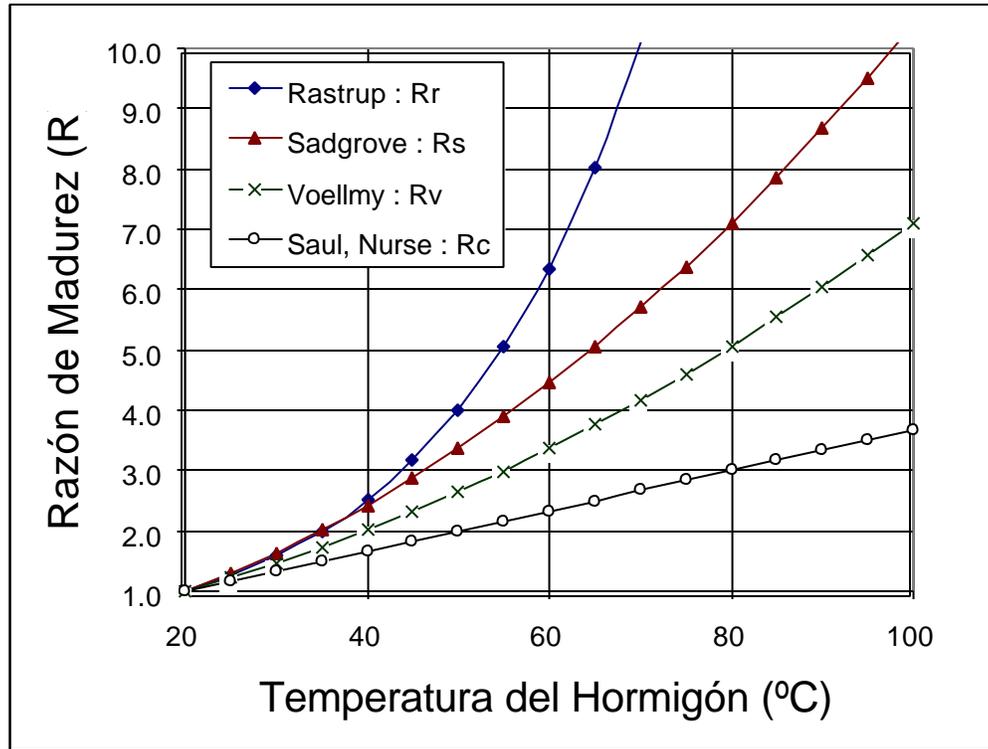


Figura 50. Temperatura y Razón de Madurez sobre los 20°C

Tabla 9. Curva de correlación para calcular R_T [VIDELA,C.; RIC N°5]

$$R_T = A + B \cdot (\log T)^C$$

Nomenclatura			Ciclo Térmico	Constantes		
Marca	W/C	Serie	Tipo	A	B	C
Polpaico	0,5	P5	2	-0,238000	0,162990	7,705061
Polpaico	0,6	P6	2	0,287199	0,067447	8,959932
Melón	0,5	M5	2	0,032216	0,195951	6,069189
Melón	0,5	M5	1	0,032216	0,195951	5,989804
Melón	0,6	M6	2	0,019959	0,214432	5,774553

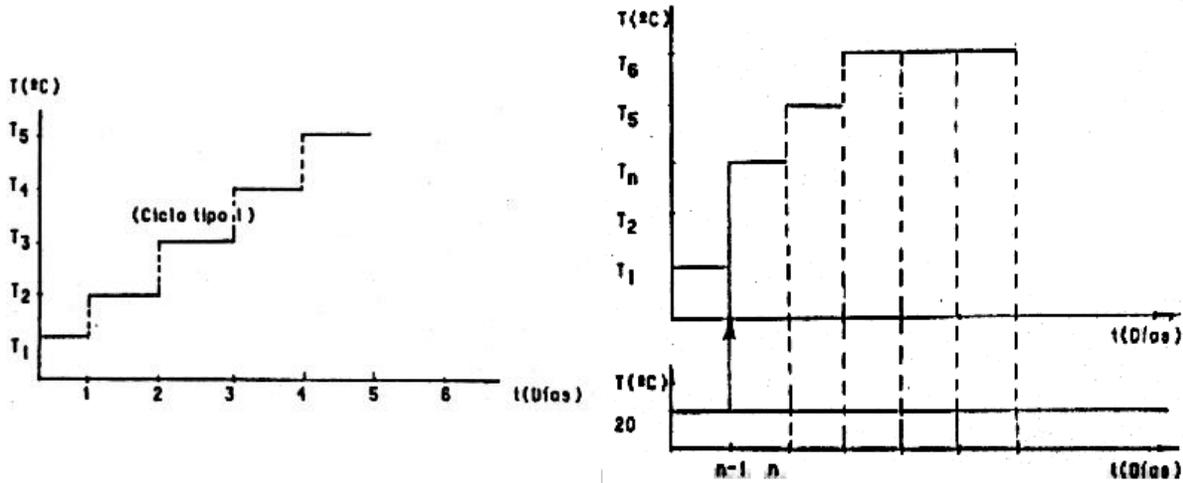


Figura 51. Ciclo Térmico de curado 1 y 2

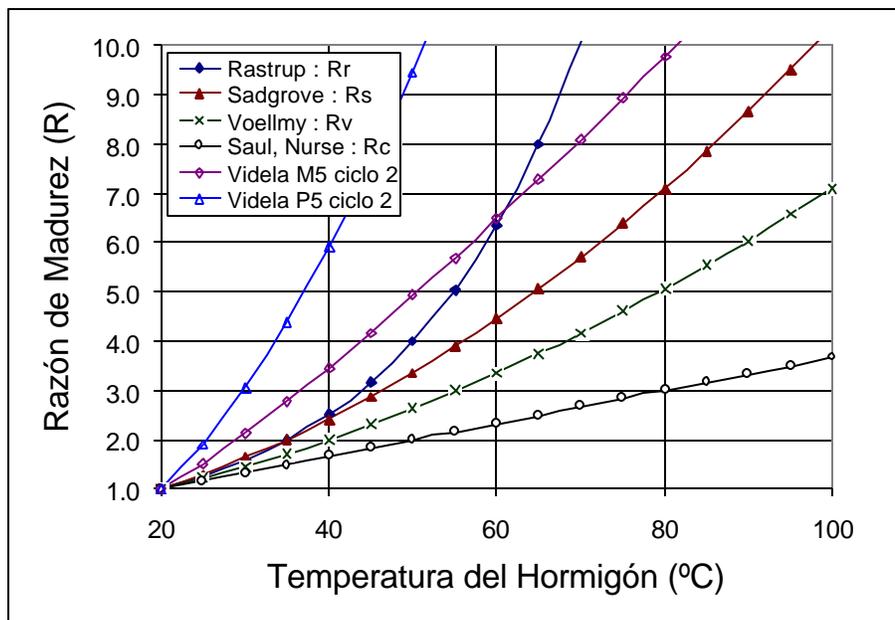


Figura 52. Comparación de los coeficientes de madurez calculados para ciclos térmicos 1 y 2 o efecto del perfil de temperatura sobre los coeficientes de madurez [VIDELA, C.; RIC N°5]

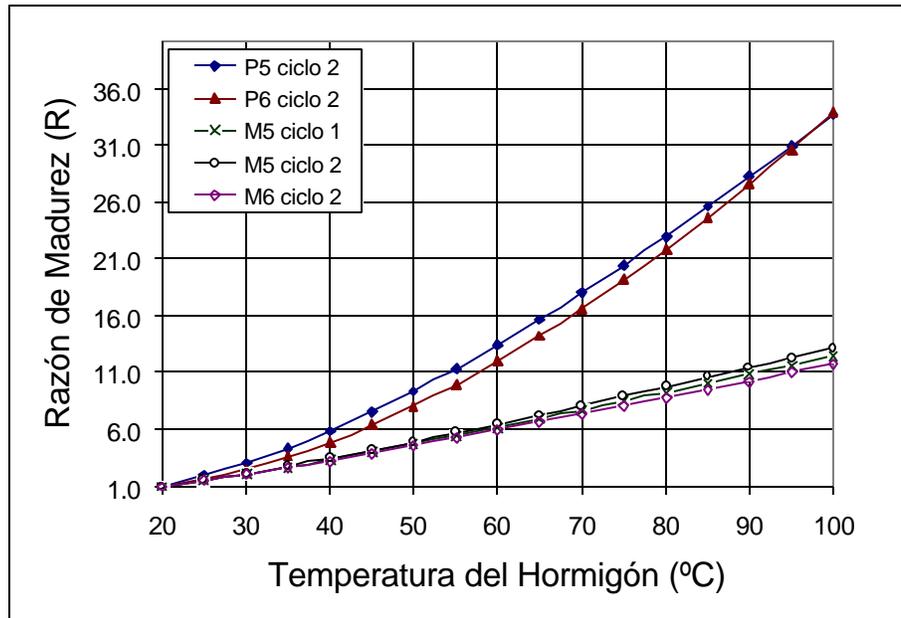


Figura 53. Efecto de la razón Agua/Cemento, el tipo de Cemento y el ciclo térmico en los coeficientes de madurez. [VIDELA,C.; RIC N°5]

Los coeficientes de madurez R_t prácticamente no varían al modificar el perfil de temperaturas del ciclo de curado.

Para una variación de la razón W/C entre 0,5 y 0,6, la variación de los coeficientes R_t es muy pequeña, para ambos tipos de cemento.

A mayor razón W/C, menor coeficiente R_t .

El tipo de cemento afecta fuertemente el valor del coeficiente R_t .

$$R_t \text{ Polpaico Especial} \approx 2 * R_t \text{ Melón Especial.}$$

Los valores de los coeficientes R_t tienen relación inversa con la velocidad de la evolución de la resistencia en los primeros días del hormigón. Melón especial es más rápido.

➤ Aplicaciones del Concepto de Madurez del Hormigón

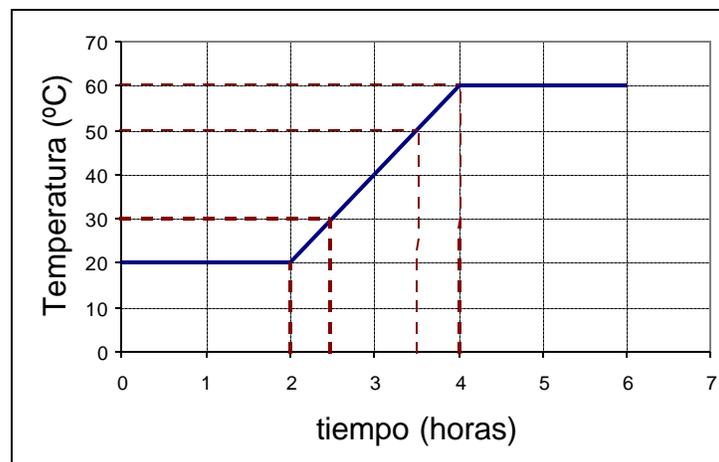
- ✓ Determinación del tiempo de desmolde
- ✓ Estimación de la resistencia potencial del hormigón
- ✓ Curado acelerado

Ejemplo de aplicación:

Se desea determinar el tiempo mínimo al que se puede poner en funcionamiento un chancador, si se especifica una resistencia mínima del hormigón de la fundación igual a 200 Kgf/cm². Las resistencias del hormigón utilizado, obtenidas en laboratorio, son:

Edad del hormigón (días)	Resistencia cúbica (kgf/cm ²)
1	60
3	130
7	190
21	280
28	310

El hormigón en obra se coloca a 20 °C y se somete al perfil de temperaturas del ciclo de curado indicado en la figura siguiente:



Solución:

1.- Determinación de la edad del hormigón, bajo ciclo térmico normalizado de laboratorio, a la que se cumple resistencia mínima especificada

$$t = 7 + (200 - 190) \frac{(21 - 7)}{(280 - 190)} = 7 + 1,56 = 8,56 \text{ días} = 206 \text{ horas a } 20^\circ \text{ C}$$

2.- Determinación del tiempo equivalente (Sadgrove) bajo ciclo térmico de la obra.

$$t_e = 2 \left(\frac{20 + 16}{36} \right)^2 + 1 \left(\frac{30 + 16}{36} \right)^2 + 1 \left(\frac{50 + 16}{36} \right)^2 + x \left(\frac{60 + 16}{36} \right)^2 = 206$$

$\Rightarrow x = 44,6 \text{ horas}$

\therefore Se puede echar a andar el chancador a las 49 horas con una resistencia de 200 kgf/cm^2

➤ *Uso de las Funciones de Madurez*

➤ Curado Acelerado

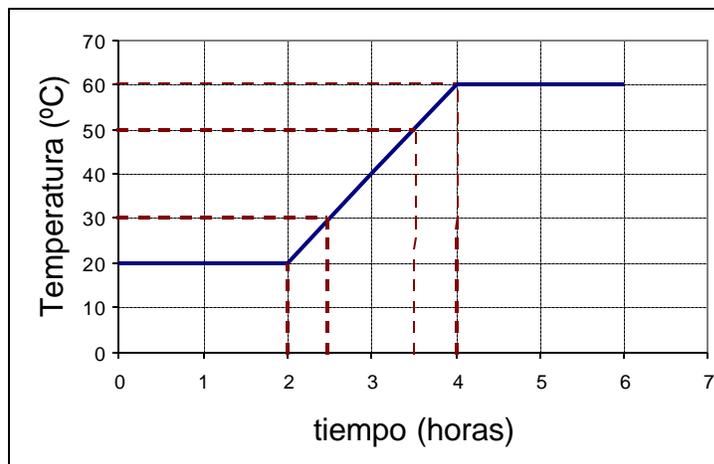
EJEMPLO:

Se necesita una resistencia de 200 Kg./cm² en el hormigón para echar a andar un chancador. El hormigón utilizado tiene una resistencia en laboratorio de:

Edad del hormigón (días)	Resistencia cúbica (kgf/cm ²)
1	60
3	130
7	190
28	280

⇒ 200 Kg/cm² en 8,6 días o madurez de 206 °C·h

La temperatura máxima que se puede obtener es de 60 °C. A qué edad se puede echar a andar el chancador si el hormigón se coloca a 20 °C.



Madurez: $2 * 1 + 1 * 1,63 + 1 * 3,36 + 44 * 4,46 = 205 \text{ °C}\cdot\text{h}$

Entonces, se puede hacer andar el chancador en 48 horas, con una resistencia de 200 Kg/cm²

➤ *Ensayos de Curado Acelerado:*

Ensayo estándar a 1 ó 3 días no es confiable. Es sensible a pequeñas variaciones de temperatura en las primeras horas y a la finura del cemento.

⇒ se debe acelerar para ganar resistencia y obtener en pocas horas una fracción importante de ella.

⇒ desarrollar métodos de curado acelerado.

Estos ensayos permiten :

- Conocer la resistencia del hormigón que se emplea en obra a muy temprana edad.
- Ajustar las dosificaciones del hormigón con prontitud y abaratar su costo
- Detectar en forma rápida hormigones con posible resistencia baja, ayudando a tomar decisiones en faena.

El ensayo de curado acelerado puede ser útil en obras donde no se puede controlar con exactitud la temperatura y la humedad de curado de probetas normales.

MÉTODOS

NORMA	ASTM C684-81			BS 1881 : 1983			CSA A231	King
Probeta	cilíndrica			Curado en agua caliente a			Cilíndrica	Cubos
MÉTODOS	Agua Tibia 35+5°C	Agua hirviendo	Autógeno curado adiabático	35°C	55+2°C	82°C	Frag. fijo Agua hirviendo	(horno esando el aire a 93°C
Fraguado fijo medido Aguja Proctor (24 Mpa)	-	-	-	-	-	-	6 - 8 hr	-
Tiempo espera pre-curado a 20 ± 1°C	-	23 hr	1 hr	≤ ¼ hr	≥ 1 hr (1½-3½)	≥ 1 hr	20 min	½ hr
Tiempo calentamiento	-	-	-	-	-	2 hr	-	1 hr
Tiempo a Tmax	24 hr	3½ hr	46 hr	24 hr	20 hr ± 10 min	14 hr	16 hr	5 hr
Tiempo de enfriamiento	-	1 hr	½ hr	-	En agua a 20 ± 5°C 1 a 2 hr	≤ 1 hr	½ hr	½ hr
Refrentado –espera	-	-	-	-	-	-	1 hr	-
Edad ensayo (horas)	24 hr	28½ hr	49 hr	24½ hr	22½ hr - 25½ hr	19 hr	25 hr	7 hr

Resistencias determinadas por cualesquiera de estos métodos de curado acelerado, son distintas y menores que R_{28} de probetas estándar.

Para un hormigón dado, se puede buscar una correlación entre R curado acelerado y $R_{\text{probeta estándar}}$ a 7 ó 28 días.

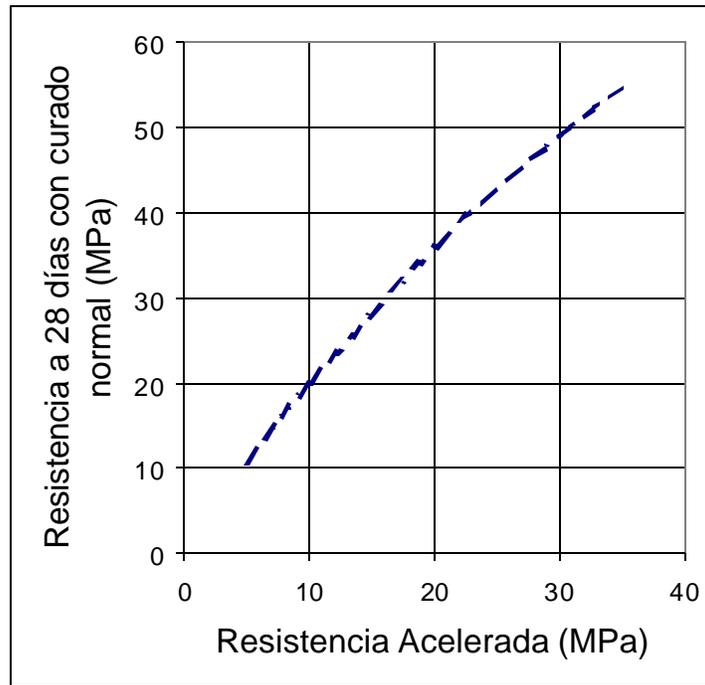


Figura 54. Relación típica entre la resistencia determinada con curado acelerado y la resistencia a los 28 días con curado normal.

$$R_{28} = \frac{180 \cdot R_a}{R_a + 80}$$

La relación se debe establecer antes de comenzar la construcción, para usar el método como ensayo de control de calidad rápido y detectar variaciones en la dosificación.

La variación de resultados del ensayo acelerado es igual o menor que el ensayo estándar.

➤ **Curado Acelerado Versus Resistencia a 28 Días** [DICTUC, APUNTES 10, 1983]

Curado acelerado a 24 horas:

Se ensayó probetas que se sometieron a un curado acelerado durante 24 horas, para buscar la correlación existente entre su resistencia y la resistencia de probetas curadas en cámara húmeda a 20 °C, humedad relativa superior al 95 % y ensayadas a los 28 días.

Para el curado acelerado se utilizó el sistema propuesto por la norma inglesa BS 1881 (BSI, 1976), consistente en:

- | | | |
|------|----------------------------------|-----------------------|
| i) | Espera antes de calentar: | 1,5 a 3,5 horas |
| ii) | Tiempo a 55 °C ± 2 °C: | 20 horas + 10 minutos |
| iii) | Enfriamiento en agua a 20 ± 5 °C | 1 a 2 horas |
| | Tiempo total: | 22,3 a 23,3 horas |

Curado acelerado de probetas cúbicas para ensayo a compresión
(probetas cúbicas de 15 cm.):

Tabla 10. Ecuaciones y valores de correlación para curado acelerado.

Tipo de cemento	Ecuación de correlación	n	r	Sy	Error estándar	Límite 95 % de confianza
Ambos	$R_{28} = 1,480 * R_{24} + 70$	39	0,995	29	29	± 59 kg/cm ²
Melón especial	$R_{28} = 1,590 * R_{24} + 61$	19	0,982	102	19	± 39 kg/cm ²
Polpaico especial	$R_{28} = 1,365 * R_{24} + 79$	20	0,937	97	34	± 67 kg/cm ²

Curado acelerado de viguetas para ensayo a flexotracción:

La correlación existente entre el ensayo de flexotracción con curado acelerado y normal a 28 días, es la siguiente:

Ecuación de correlación	n	r	Sy	Error estándar	Límite 95 % de confianza
$R_{28} = 0,920 * R_{24} + 20$	38	0,772	8,3	5,3	± 10,6 kg/cm ²

➤ Curado al Vapor a Presión Atmosférica ($T < 100\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Objetivo: Obtener una resistencia temprana grande para manipular rápidamente los productos.

Uso: Elementos prefabricados.

Procedimiento: Cámaras, túneles, y recubrimientos plásticos

Efecto: Influencia adversa de alta temperatura inicial en resistencia a largo plazo.

No se debe permitir un aumento rápido de temperatura

Efecto negativo:

- más pronunciado a mayor razón W/C
- más notorio con cemento grado Alta Resistencia, que con cemento corriente.

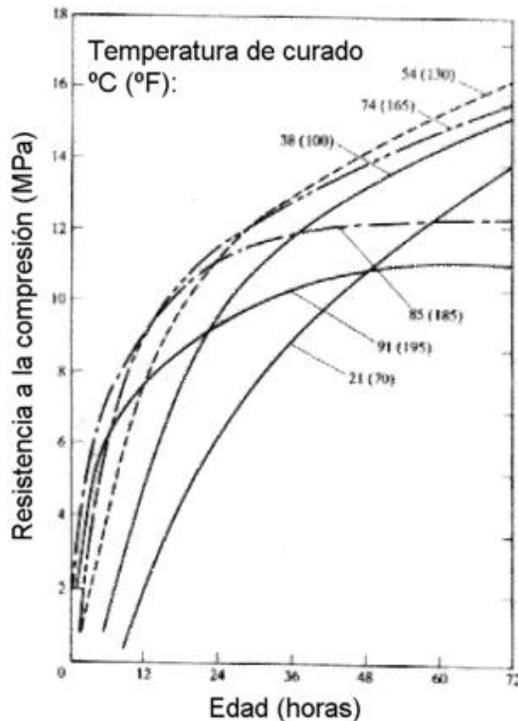


Figura 55. Resistencia del hormigón curado al vapor a diferentes temperaturas (Razón W/C=0,50; curado aplicado inmediatamente después de moldeado)

Ciclo curado al vapor

- Compromiso entre requerimientos de resistencia a corto y largo plazo
- Gobernado por la disponibilidad de tiempo
- Consideraciones económicas.

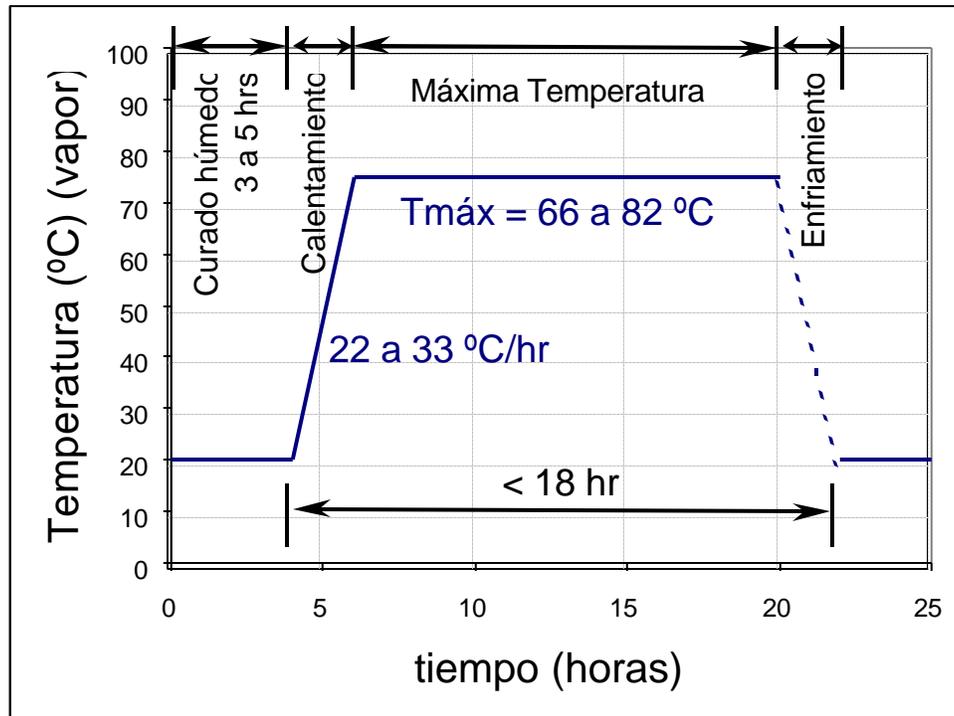


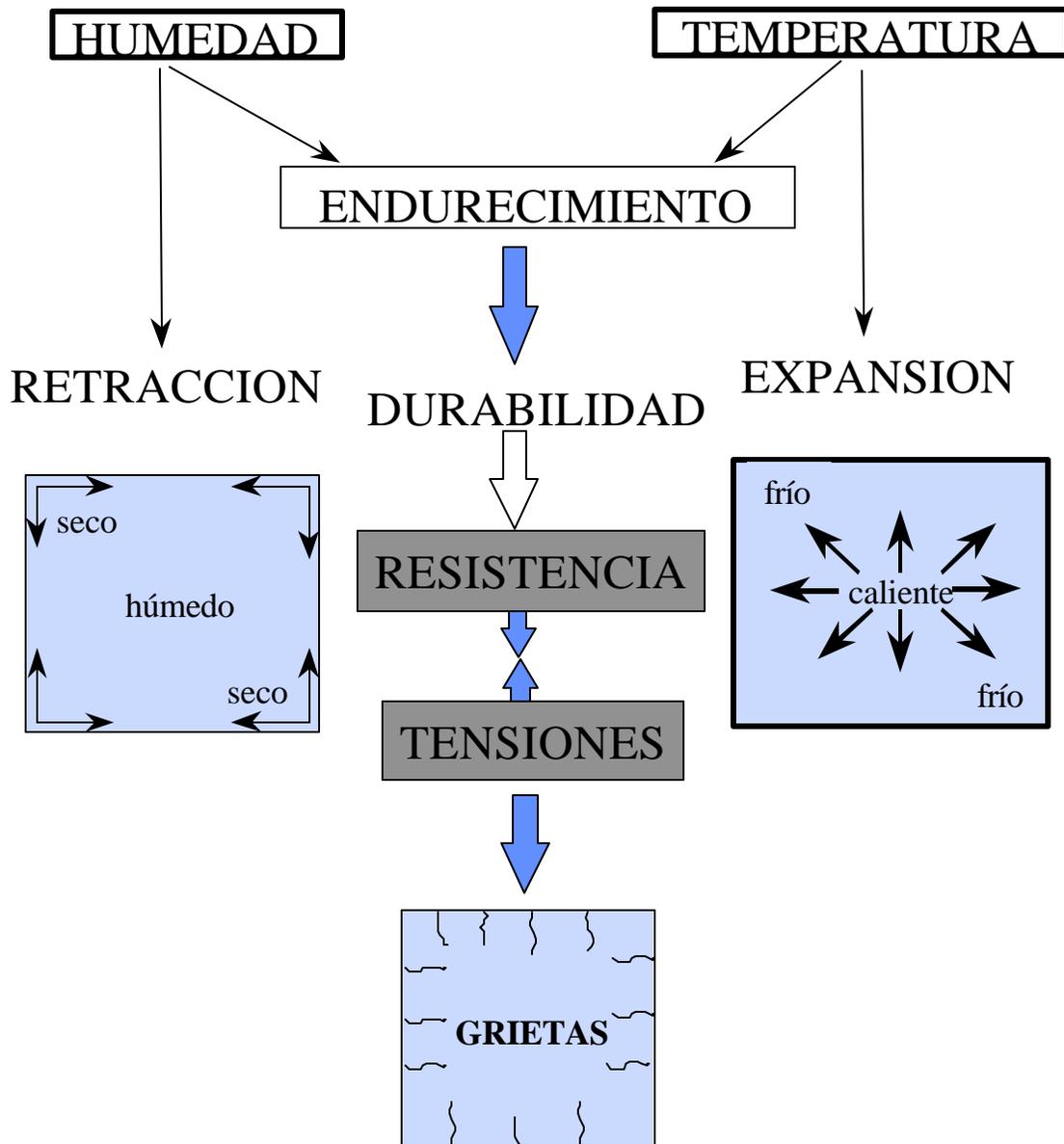
Figura 56. Típico ciclo de curado al vapor

Es deseable una lenta velocidad de calentamiento y enfriamiento, para evitar agrietamiento y gradientes térmicos por choque térmico.



Variaciones de Volumen del Hormigón Endurecido

(2ª Parte)





INDICE

DEFORMACIONES DEL HORMIGÓN INDEPENDIENTES DE CARGA	4
• EFECTO DE RESTRICCIONES A VARIACIONES DE VOLUMEN.....	5
• PREVENCIÓN Y CONTROL DEL GRIETAMIENTO.....	7
VARIACIONES DE VOLUMEN CAUSADAS POR LA HUMEDAD	8
• CAUSAS DE PRODUCCIÓN.....	8
➤ Retracción por causas endógenas (internas).....	8
➤ Retracción por secado o tensión superficial.....	9
CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE RETRACCIÓN HIDRÁULICA	10
➤ Proceso De Producción De La Retracción Hidráulica	10
➤ Componentes Del Proceso De Retracción Hidráulica Bajo Ciclos Alternados De Secado Y Mojado.....	10
➤ Proceso Evolutivo	12
➤ Proceso Produce Dos Tipos De Retracción.....	12
PRINCIPALES PARÁMETROS QUE CONDICIONAN LA RETRACCIÓN HIDRÁULICA	13
➤ Características Del Hormigón.....	13
➤ Condiciones Ambientales	13
➤ Tiempo.....	14
➤ Condiciones Geométricas Y Restricciones.....	14
➤ Efecto De La Dosis De Árido	14
➤ Efecto Del Tipo De Árido.....	15
➤ Efecto De La Razón W/C	16
➤ Efecto De La Humedad Relativa Del Ambiente	16
➤ Efecto Del Tamaño Y Forma Del Elemento.....	17
➤ Efecto Del Tiempo.....	17
➤ Efecto del Tiempo de Curado al Momento del Secamiento	18
PROCEDIMIENTOS PARA EVALUACIÓN DE LA RETRACCIÓN HIDRÁULICA	19
• MEDIANTE EXPRESIONES NUMÉRICAS	19



- Método del Comité Europeo del Hormigón (CEB) 19
- Recomendaciones Internacionales para la Predicción de la Retracción (1970) CEB - FIP... 22
- Metodo Ingles Bs 8110:1985..... 23
- Mediante Ensayos De Laboratorio 24
- Predicción de la Retracción Hidráulica por medio de Ensayos de Laboratorio 26

MEDIDAS PARA ATENUAR LA RETRACCIÓN HIDRÁULICA.. 27

VARIACIONES DE VOLUMEN CAUSADAS POR CARBONATACIÓN..... 28

- Mecanismo De Retracción Por Carbonatación..... 28
- Características Del Proceso De Carbonatación..... 29
- Efectos De La Carbonatación..... 30
- Evaluación 30
- Recomendación 31

VARIACIONES DE VOLUMEN CAUSADAS POR LA TEMPERATURA..... 32

- Causas De Producción..... 32
- **PRINCIPALES FACTORES QUE CONDICIONAN LA RETRACCIÓN TÉRMICA..... 34**
 - Efecto del Tipo y Dosis de Cemento..... 35
 - Efecto de Materiales de Reemplazo del Cemento..... 37
 - Efecto del Espesor de la Sección..... 38
 - Efecto del Tipo de Moldaje y Aislación 38
- **EVALUACIÓN DE LA RETRACCIÓN TÉRMICA..... 39**
 - Determinación de las deformaciones unitarias:..... 39
 - Determinación de la temperatura del hormigón fresco recién mezclado:..... 39
 - Determinación de la elevación de temperatura adiabática del hormigón debido al calor de hidratación 40
 - Determinación de la distribución de temperaturas 40
 - Cálculo temperatura media a partir de distribución temperaturas..... 41
 - Coeficiente de dilatación térmica del hormigón..... 41
 - Mecanismo De Agrietamiento Térmico Del Hormigón..... 46
 - Agrietamiento Termico Y Por Retracción..... 48
 - (Cont. Mecanismos de Agrietamiento Térmico del Hormigón)..... 50
 - Criterio Diferencia Máxima De Temperatura En Elementos Masivos..... 51
 - Efecto Del Tipo De Restricción En El Agrietamiento Térmico Del Hormigón..... 52
 - Restriccion Interna..... 53
 - Factores Que Afectan El Agrietamiento Térmico Del Hormigón..... 54
 - Medidas Para Atenuar Efectos De La Retracción Térmica 55

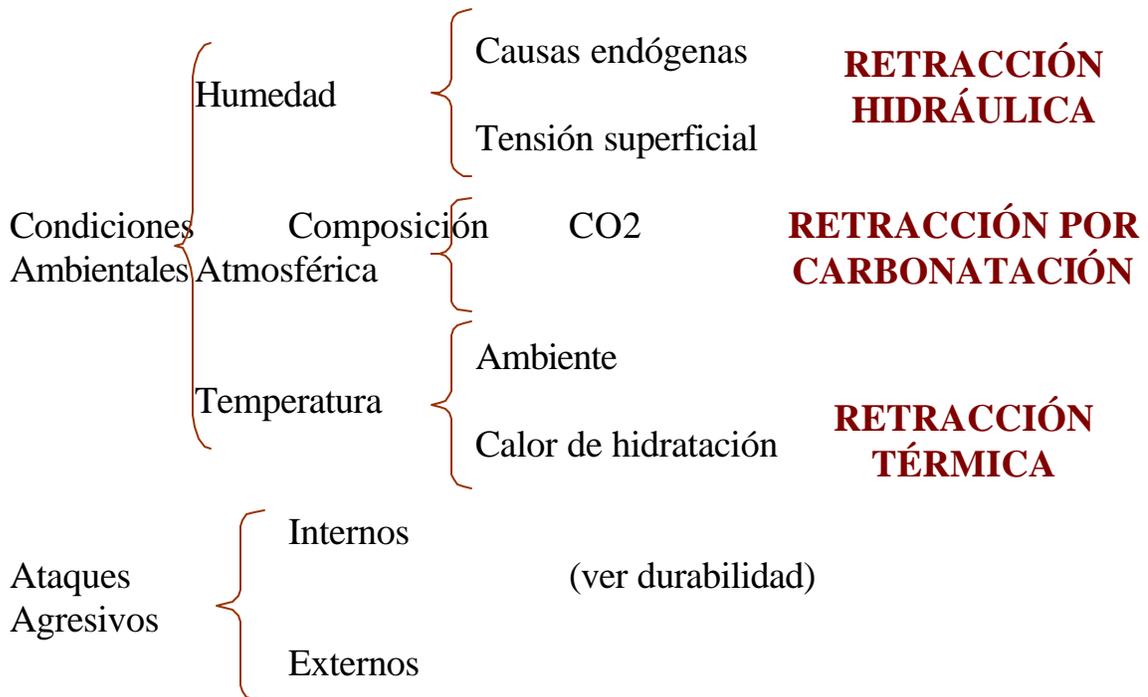


DEFORMACIONES DEL HORMIGÓN INDEPENDIENTES DE CARGA

Hormigón sufre variaciones de volumen (dilataciones o contracciones) por causas físico - químicas. Los movimientos se producen durante toda su vida útil.

Principales Causas de Variaciones de Volumen

Tipo y magnitud afectadas por





Comparación entre Retracción Hidráulica y Térmica

Retracción térmica más rápida e intensa

Retracción hidráulica más lenta y suave, pero sostenida

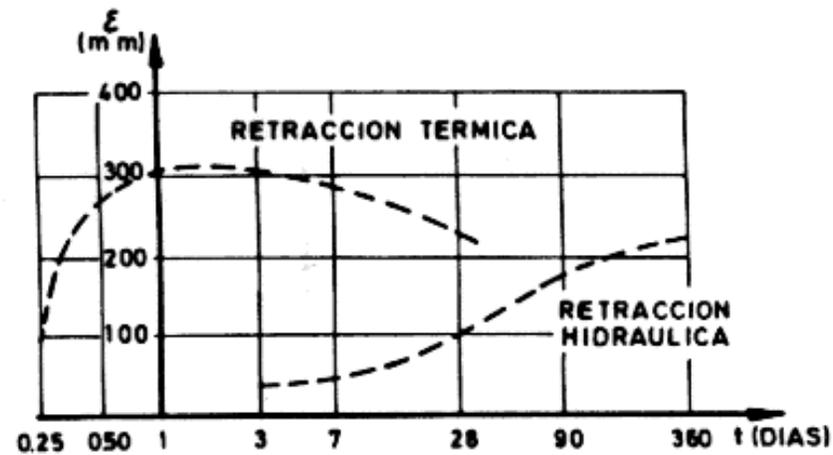


FIG. Evolución Comparativa de los efectos Térmicos y Retracción Hidráulica.

Figura 1. Evolución comparativa de los efectos térmicos y retracción hidráulica.

• EFECTO DE RESTRICCIONES A VARIACIONES DE VOLUMEN

Efecto de restricciones

Los movimientos por variaciones volumétricas están generalmente total o parcialmente restringidos.

→ Se inducen tensiones (σ_{ct})

si $\sigma_{ct} > f_{ct}$ → AGRIETAMIENTO

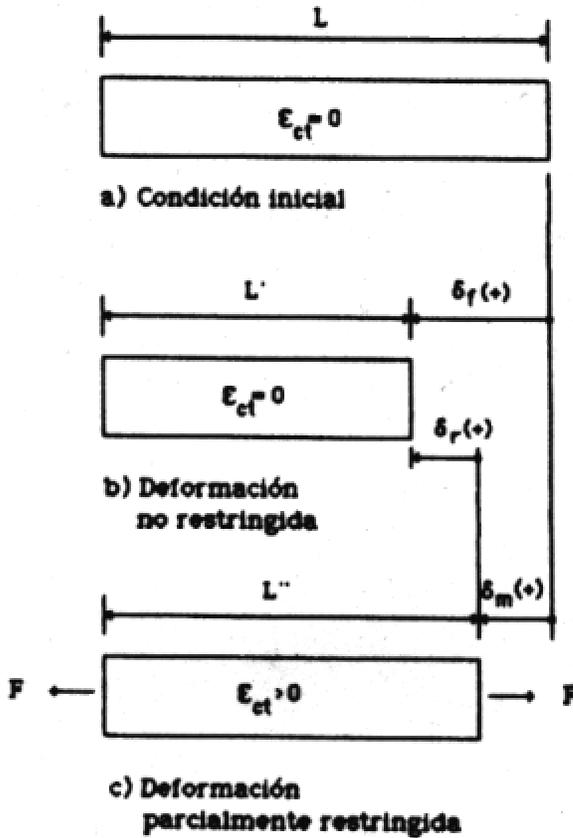


Figura 2. Deformación y restricción.

Fig. Deformación y restricción

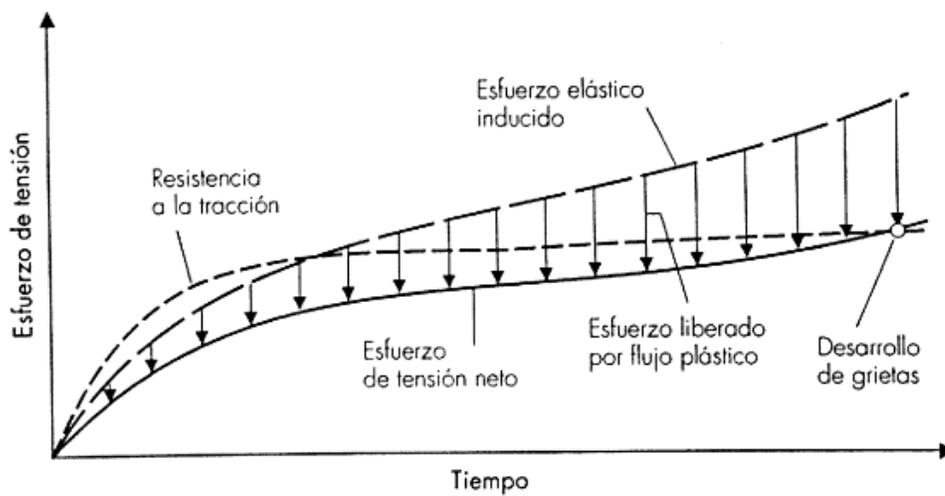


Figura 3. Desarrollo de una grieta cuando el esfuerzo a tracción debido a la contracción de fraguado reprimida, es aliviado por el flujo plástico.



● PREVENCIÓN Y CONTROL DEL GRIETAMIENTO

Las grietas deben ser evitadas o controladas porque afectan:

- Durabilidad
- Integridad estructural
- Serviciabilidad
- Apariencia

Prevenición

Modificación de propiedades del material para reducir o eliminar cambios volumétricos potenciales:

- Selección cuidadosa y control de los constituyentes del hormigón
- Selección cuidadosa y control de los procedimientos colocación y curado

Modificación de las restricciones efectivas para reducir o eliminar las tensiones desarrolladas:

- Juntas de movimiento
- Secuencia de construcción

Control

- Uso de cementos expansivos
- Refuerzo con armaduras de fibras
- Pretensado
- Uso de armaduras de acero



VARIACIONES DE VOLUMEN CAUSADAS POR LA HUMEDAD

(RETRACCIÓN HIDRÁULICA)

• CAUSAS DE PRODUCCIÓN

➤ *Retracción por causas endógenas (internas)*

- Se derivan de variaciones de volumen de la pasta de cemento durante procesos de fraguado y endurecimiento:

- Volumen absoluto de los compuestos hidratados de la pasta cemento es menor que el volumen de los compuestos originales del cemento → contracción.
Retracción endógena es pequeña Å 50 a 100 (μ/m)
- Volumen final depende de humedad ambiente:
 - Ambiente saturado → gel absorbe agua exterior → aumento volumen
Expansión Å 100 a 150 (μ/m)
 - Ambiente seco → gel absorbe agua interior → disminución volumen



➤ ***Retracción por secado o tensión superficial***

(Retracción tensión superficial >> retracción causas endógenas)

Ambiente no saturado (humedad relativa < 90%) → agua amasado tiende a evaporarse progresivamente



Estructura interna hormigón es discontinua: poros, canales y microfisuras de tamaño capilar, parcialmente vacíos



Equilibrio entre fases líquida (agua) y gaseosa (aire) produce tensión superficial.



Tensión superficial se transmite como compresión a paredes discontinuidades → produce contracción del hormigón



CARACTERÍSTICAS DEL PROCESO DE RETRACCIÓN HIDRÁULICA

➤ *Proceso De Producción De La Retracción Hidráulica*

- **ambiente saturado** → retracción endógena → dilatación del hormigón
HR = 90 %
- **ambiente seco** → retracción endógena + retracción por secamiento
→ contracción del hormigón

➤ *Componentes Del Proceso De Retracción Hidráulica Bajo Ciclos Alternados De Secado Y Mojado*

- **IRREVERSIBLE**: asociada con formación de uniones físicas y químicas adicionales en el gel de cemento
- **REVERSIBLE O MOVIMIENTO DE HUMEDAD**: expansión debida a absorción de agua por pasta cemento, aproximadamente 40 a 70 % de la retracción por secado. Depende de la edad antes del primer secado y es mayor a mayor grado hidratación.
- **Magnitud movimiento cíclico de humedad depende:**
 - Duración de los períodos de secado y mojado:
 - secado es más lento; consecuencias de tiempo seco prolongado se revierte en corto período de lluvia
 - Rango de humedad relativa
 - Composición del hormigón
 - Grado de hidratación en momento del secado inicial
 - Rigidez de los áridos

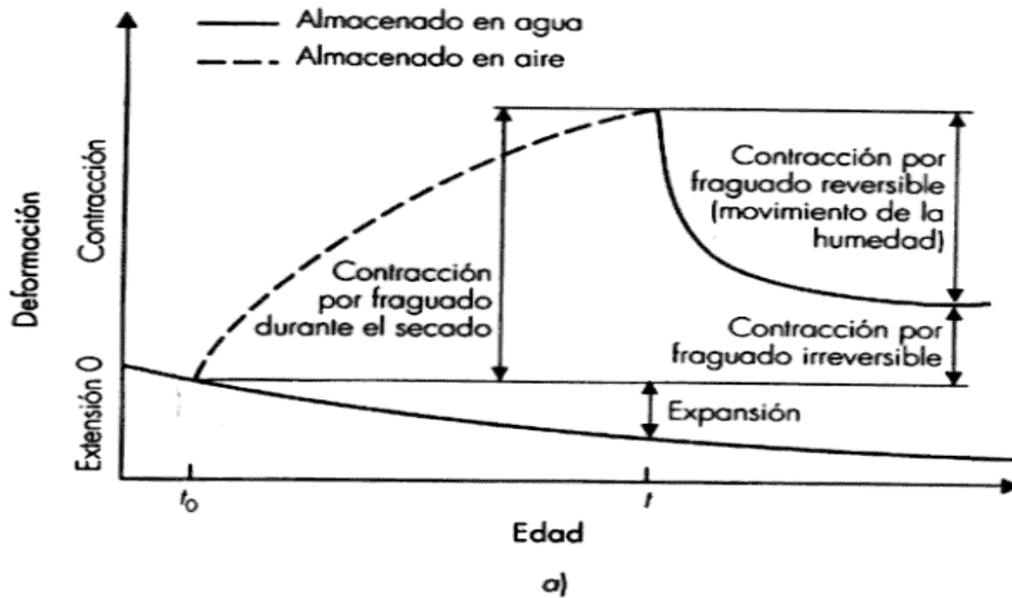


Figura 4. Movimiento de la humedad en el hormigón, secado desde edad t_0 hasta la edad t donde fue resaturado.

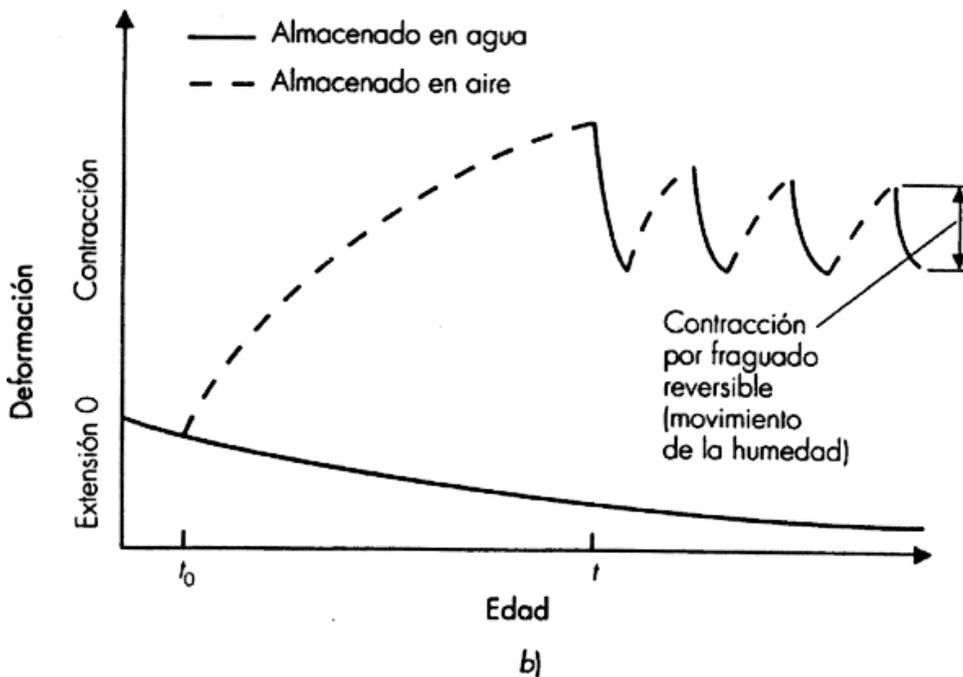


Figura 5. Movimiento de la humedad en el hormigón, que se ha secado desde la edad t_0 hasta la edad t y luego estuvo sujeto a ciclos de secado y mojado.



➤ *Proceso Evolutivo*

- La retracción varía en función del tiempo
- Retracción endógena a medida produce fraguado y endurecimiento
- Retracción por secado según avanza el secado progresivo del hormigón
- Progresión secado se produce desde el exterior hacia el interior

Proceso relativamente lento

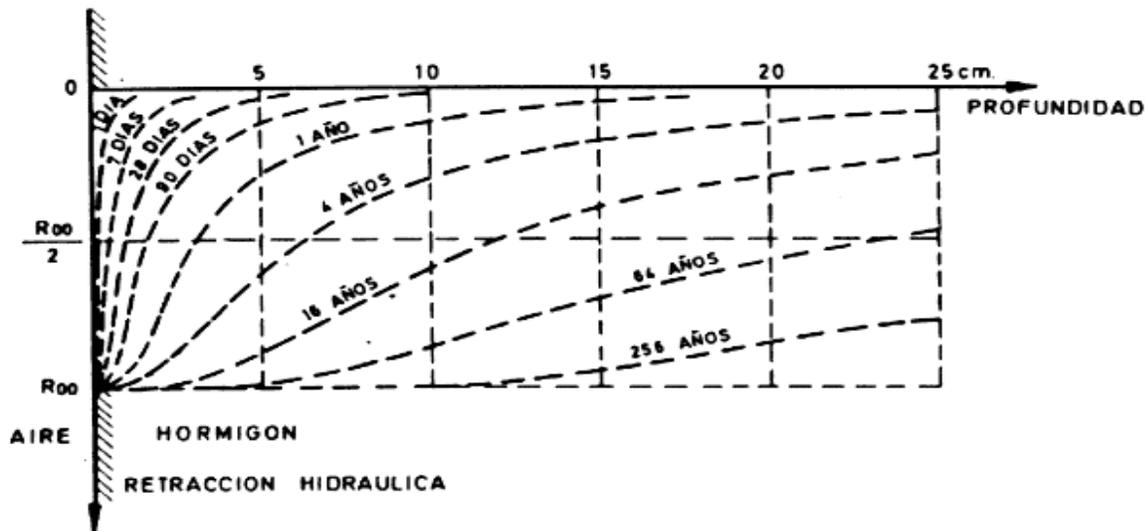


Figura 6. Evolución de la retracción de un elemento de hormigón.

➤ *Proceso Produce Dos Tipos De Retracción*

Retracción diferencial interna:

- Restricción generada por gradiente de humedad entre secciones contiguas
- Importante en elementos masivos
- Agrietamiento se limita a parte del espesor

Retracción global:

- Concierno a todo el elemento
- Ligada a restricciones externas del elemento
- Importantes en elementos esbeltos (pavimentos, estucos)



- Agrietamiento afecta parte importante de la sección

PRINCIPALES PARÁMETROS QUE CONDICIONAN LA RETRACCIÓN HIDRÁULICA

➤ *Características Del Hormigón*

- Composición química del cemento
Si composición favorece fraguado rápido pasta (alto C3A) también será favorable para más alta contracción inicial
- Finura del cemento
Finura alta similar a composición endógena
- **Dosis cemento**
Mayor proporción de pasta → mayor retracción
Relación casi directa entre dosis cemento y retracción

**Retracción
endógena**

- Porosidad (finura y absorción) de los áridos
Mayor porosidad → mayor retracción
- **Contenido en volumen áridos**
Restringen cantidad retracción pasta
- Propiedades elásticas del árido y pasta
- Retracción del árido
- **Dosis de agua y razón W/C**
Mayor dosis agua → mayor porosidad y retracción
- Aditivos:
Si W/C = cte. → retardadores poco efecto
aceleradores aumentan retracción

**Retracción por
tensión superficial**

➤ *Condiciones Ambientales*

Humedad condiciona velocidad evaporación del agua interior

→ Retracción endógena y tensión superficial

- condiciones de curado



➤ condiciones de secamiento

➤ **Tiempo**

- Velocidad retracción disminuye rápidamente con el tiempo

14 a 34 % de la retracción a 20 años se produce en 2 semanas

40 a 80 % de la retracción a 20 años se produce en 3 meses

66 a 85 % de la retracción a 20 años se produce en 1 año

➤ **Condiciones Geométricas Y Restricciones**

- Dimensiones del elemento (razón V/S) → Retracción tensión superficial

- Armadura de refuerzo

➤ **Efecto De La Dosis De Árido**

- Áridos restringen magnitud retracción pasta de cemento

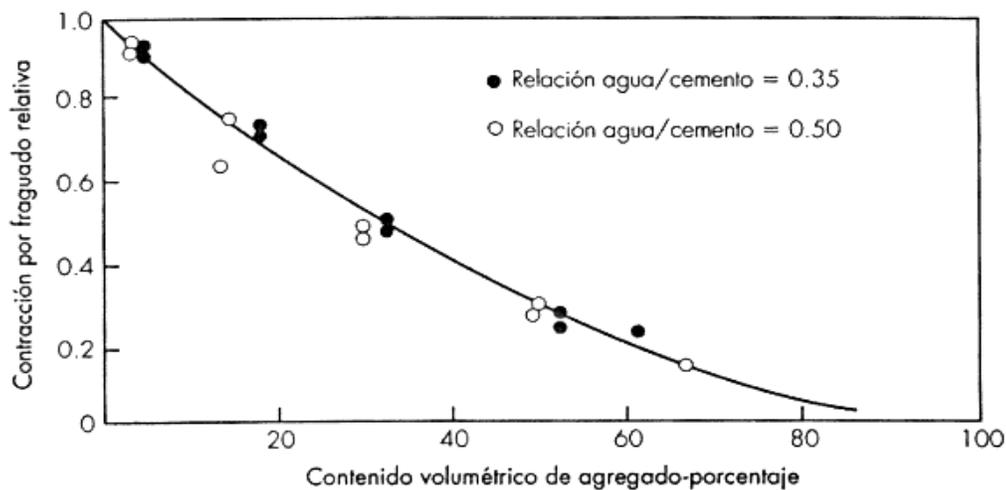


Figura 7. Influencia del contenido volumétrico del agregado en relación a la contracción por fraguado.

- Para $W/C = \text{cte.}$ y grado hidratación dado, retracción hormigón:

$$\epsilon_{sh} = \epsilon_{sp} (1 - g)^n$$

con:

g = concentración relativa del árido en volumen

$n = 1,2$ a $1,7$ (depende módulo elasticidad y coef. Poisson árido y pasta)

ϵ_{sp} = retracción pasta cemento sola

- Tamaño máx. y granulometría árido por si mismos no afectan magnitud retracción hormigón para g y W/C dados.



- Mayor tamaño máx. → menor C para W/C = cte. → menor retracción
- Aumentar dosis árido de 71 a 74 % reduce retracción en ≈ 20 %

➤ Efecto Del Tipo De Árido

- Módulo de elasticidad del árido influye en retracción del hormigón
 - Menor E → Mayor retracción
 - Cambia valor de constante n

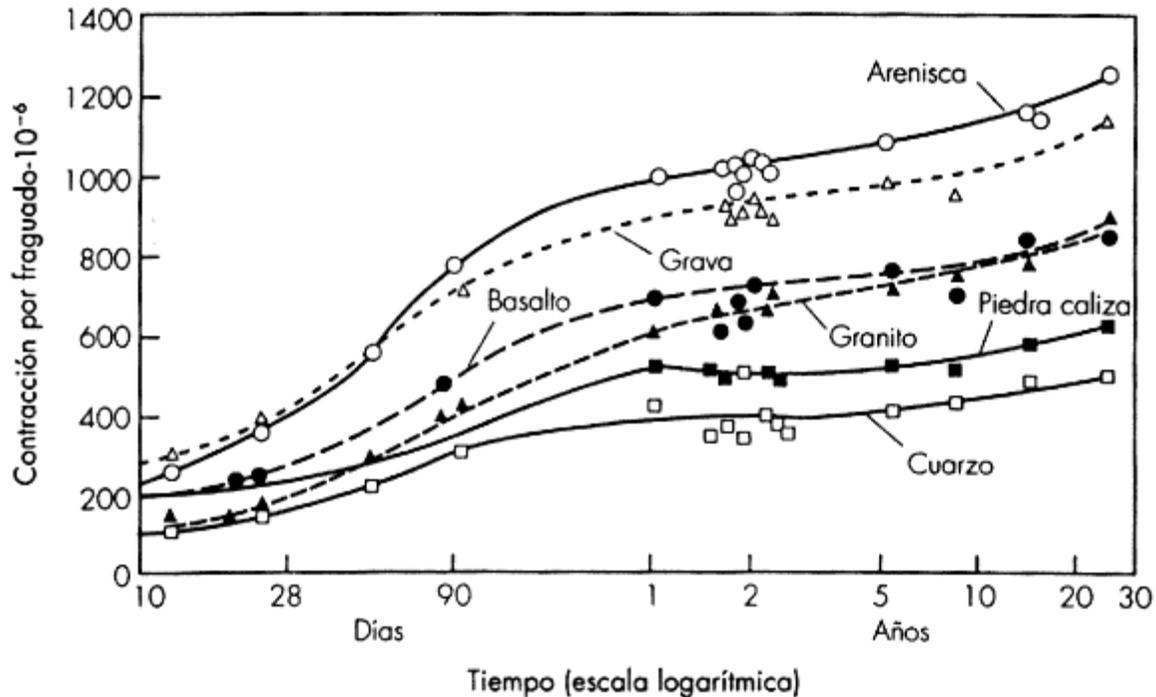


Figura 8. Contracción de fraguado de hormigones de proporciones de mezcla fija, hechos con distintos agregados.



➤ Efecto De La Razón W/C

- A mayor W/C → Mayor retracción
- Para dosis árido dada, retracción es función de W/C

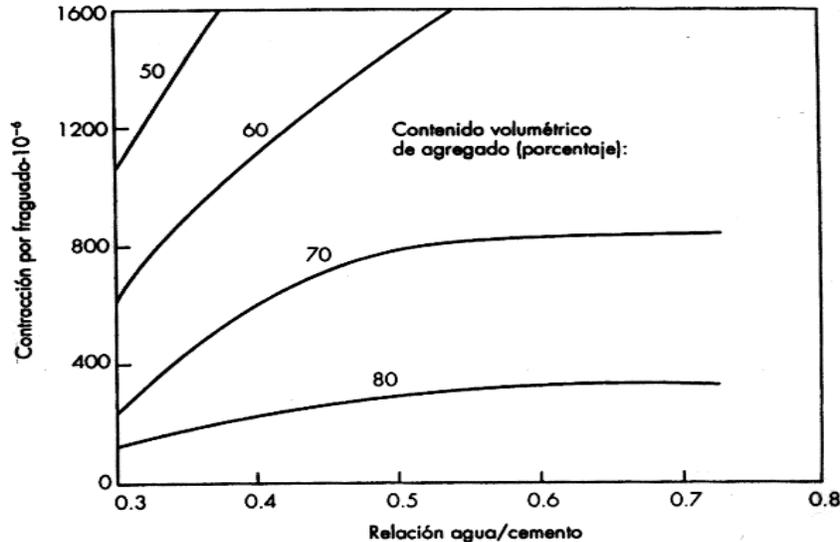


Figura 9. Influencia de la relación W/C y el contenido de agregado en la contracción por fraguado.

➤ Efecto De La Humedad Relativa Del Ambiente

- Menor HR mayor retracción del hormigón

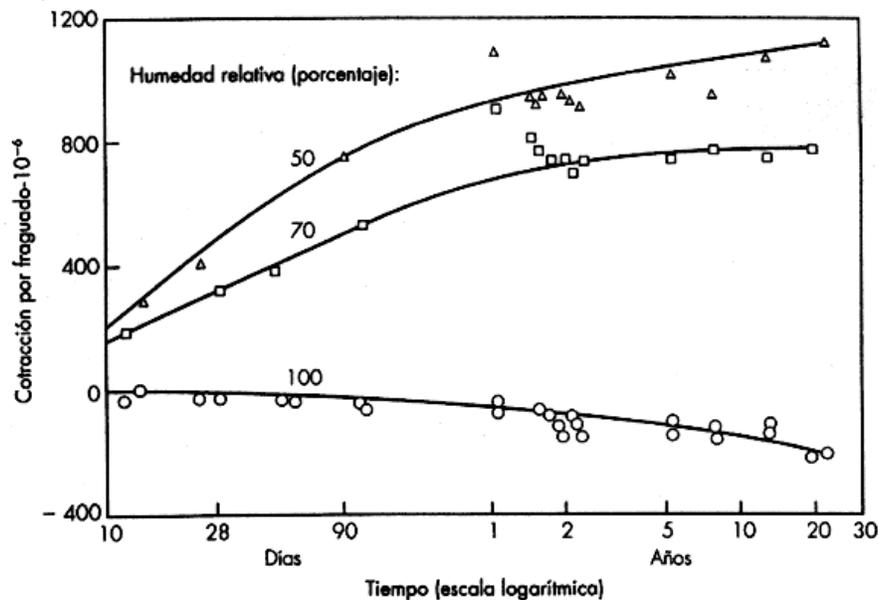


Figura 10. Relación entre la contracción por fraguado y el tiempo para hormigones almacenados a diferentes humedades relativas.



➤ **Efecto Del Tamaño Y Forma Del Elemento**

- Efecto forma es pequeño
- Retracción se puede expresar como función de la razón Volumen / superficie expuesta

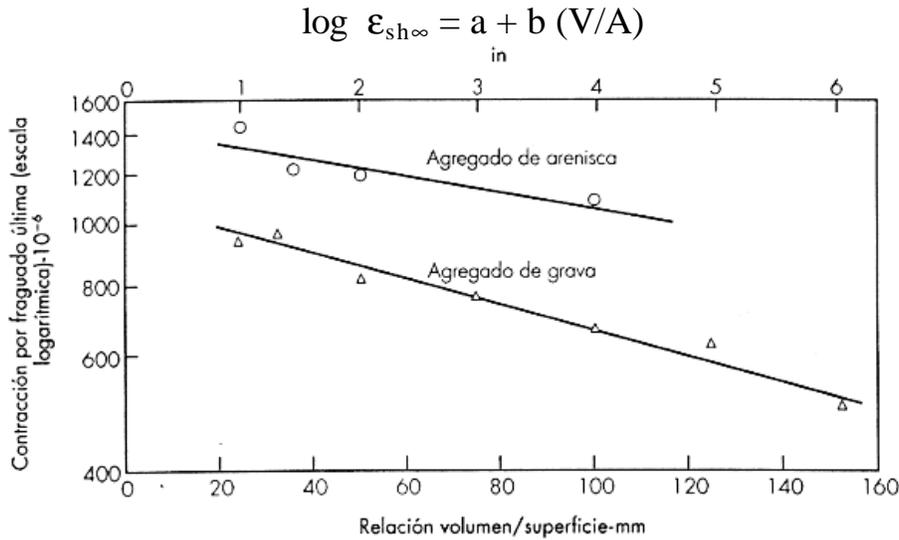


Figura 11. Relación entre la contracción de fraguado final y la relación volumen / superficie

➤ **Efecto Del Tiempo**

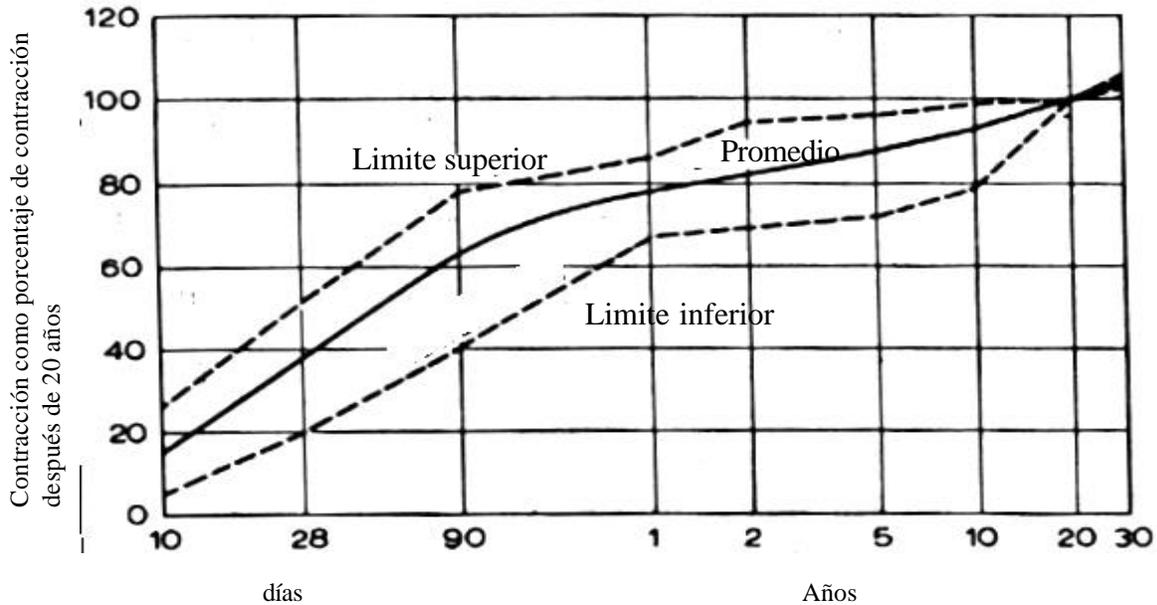


Figura 12. Rango de contracción en el tiempo para diferentes hormigones almacenados a H.R. de 50% y 70%.



- Velocidad retracción disminuye rápidamente con el tiempo
 - 14 a 34 % de la retracción a 20 años se produce en 2 semanas
 - 40 a 80 % de la retracción a 20 años se produce en 3 meses
 - 66 a 85 % de la retracción a 20 años se produce en 1 año

➤ *Efecto del Tiempo de Curado al Momento del Secamiento*

- Mayor tiempo aumenta volumen gel cemento y aumenta retracción pasta
- En hormigones, tiempos de curado menores a 1 mes no aparecen afectar magnitud retracción; curado prolongado parece reducir retracción



PROCEDIMIENTOS PARA EVALUACIÓN DE LA RETRACCIÓN HIDRÁULICA

• MEDIANTE EXPRESIONES NUMÉRICAS

➤ Método del Comité Europeo del Hormigón (CEB)

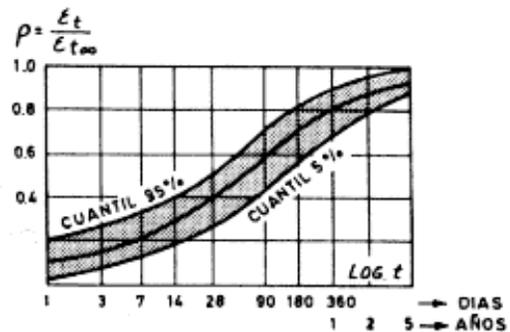
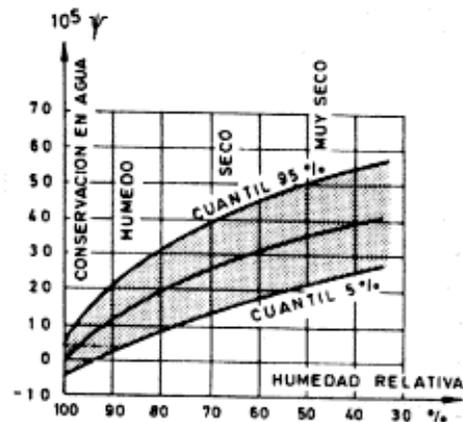
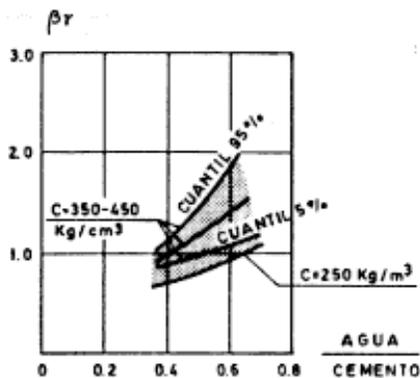
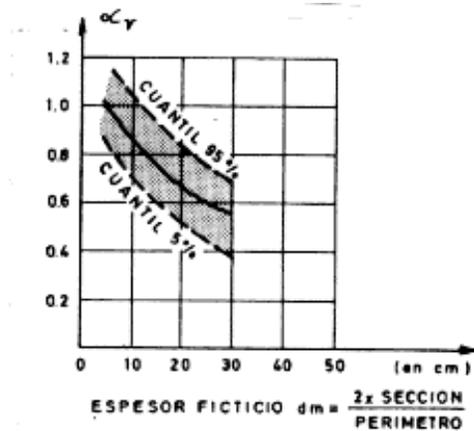
$\delta r(t) = \alpha_r \times \beta_r \times \psi \times \rho = \epsilon_{t^{\infty}} \times \rho$

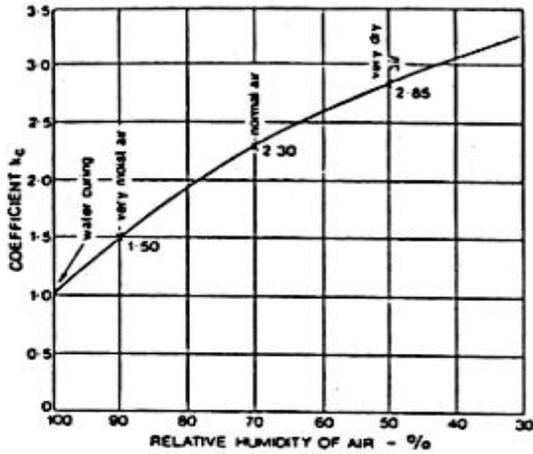
 α_r = coef. depende forma geométrica

 β_r = coef. depende dosificación

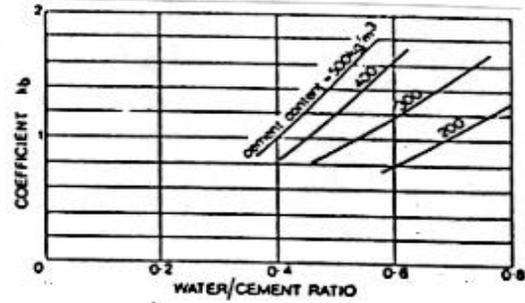
 ψ = coef. depende humedad ambiente

 ρ = coef. depende evolución en

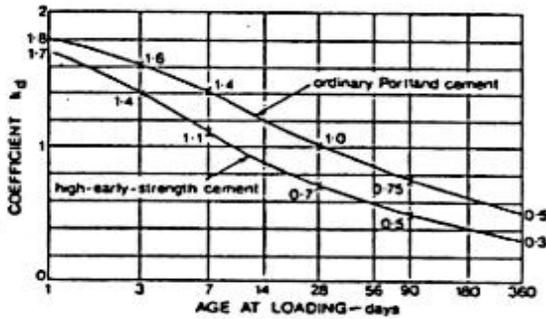




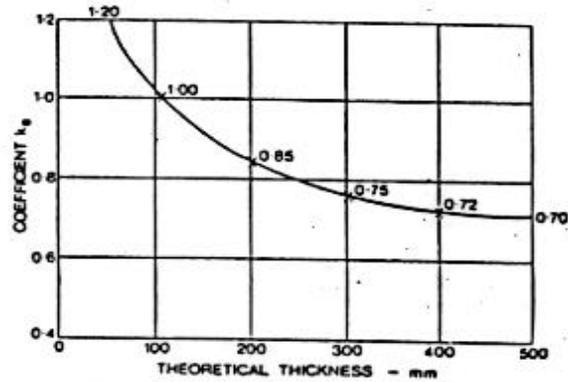
Sólo creep



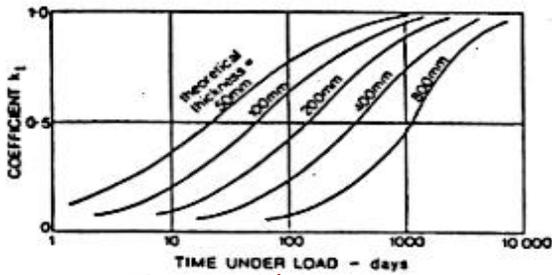
Retracción y creep



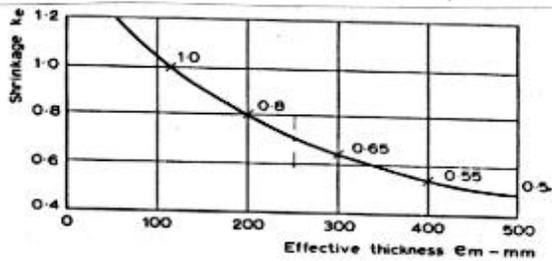
Sólo creep



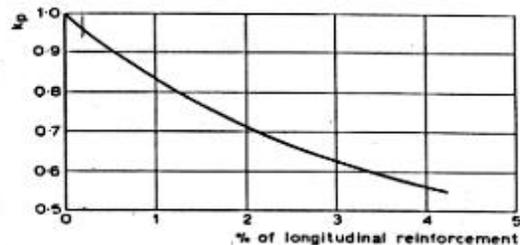
Sólo creep



Retracción y creep



Sólo retracción hidráulica



Sólo retracción hidráulica



➤ *Recomendaciones Internacionales para la Predicción de la Retracción (1970) CEB - FIP*

La deformación ϵ_{cs} por retracción en cualquier instante puede ser determinada por el producto de cinco coeficientes parciales:

$$\epsilon_{cs} = \epsilon_o * k_b * k_e * k_p * k_t$$

donde:

ϵ_o depende del ambiente

k_b depende de la composición del hormigón

k_e depende del espesor efectivo de la sección ($e_{cf} = 2 * vol / sup. expuesta$)

$$p = 100 A/B$$

donde:

A = área de enfierradura

B = área de la sección de concreto

n = 20 considerando el efecto del creep

$$k_p = 100 / (100 + n * p)$$

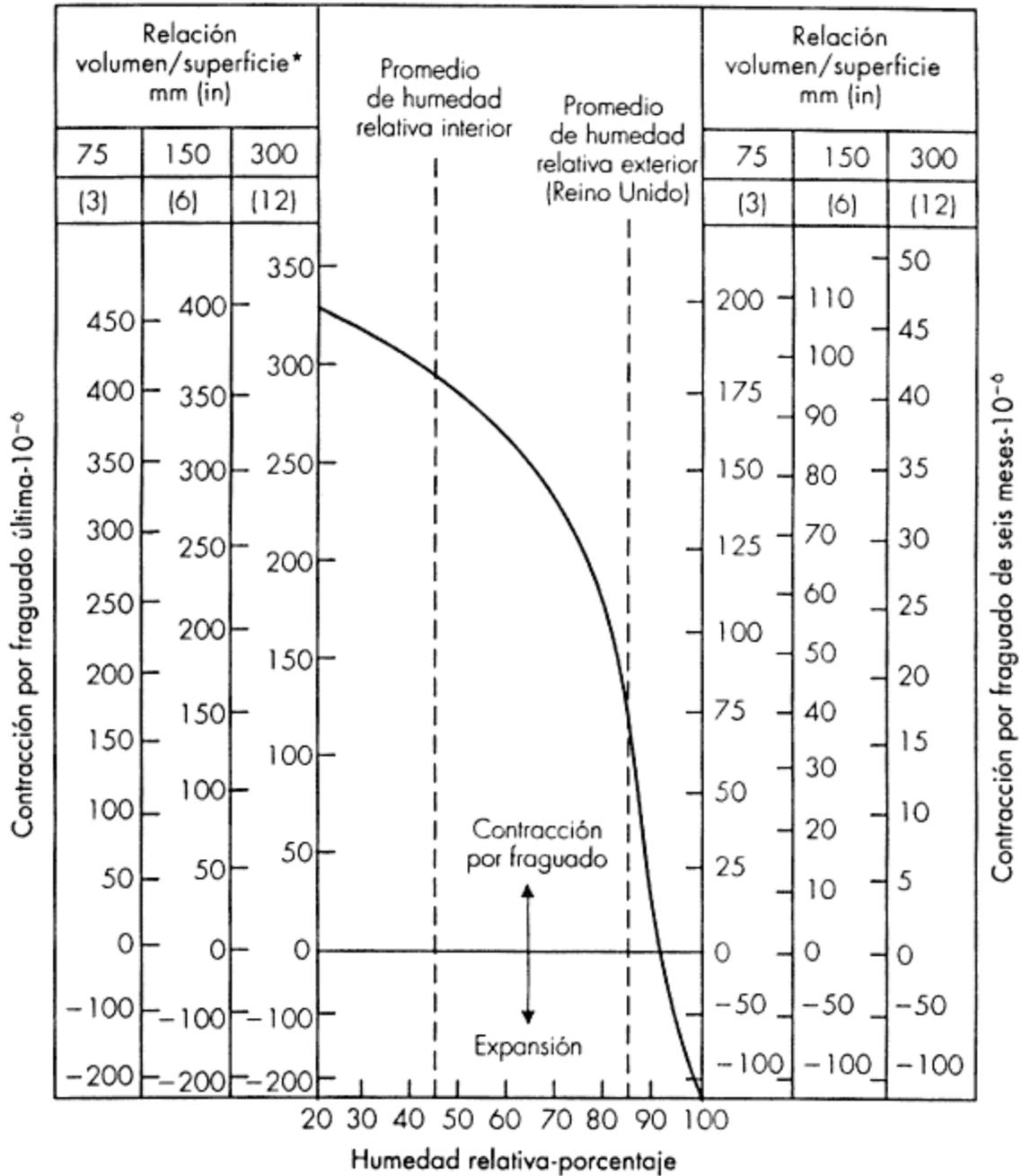
k_t define el desarrollo de la retracción como función del tiempo.

Como regla general, ϵ_{cs} es una función de k_p que da la reducción del largo de la fibra en el centro de gravedad del acero considerado.

Los valores promedio de los coeficientes ϵ_c , k_b , k_e y k_t , como función de los parámetros que los definen, pueden ser tomados del siguiente diagrama. Éstos son válidos sólo para hormigones que han sido protegidos de una excesiva pérdida de humedad en sus primeros días.



➤ **Metodo Ingles Bs 8110:1985**



*Algunas veces del término "espesor de sección efectiva" se usa para representar el tamaño de un miembro; espesor de la sección efectiva = 2 x relación volumen/superficie.

Figura 13. Predicción de la contracción de fraguado y abultamiento de hormigones de agregado denso de alta calidad (BS 8110: Prate 2: 1985.)



➤ *Mediante Ensayos De Laboratorio*

Procedimiento:

Medición de la variación de longitud de probetas de mortero normalizadas, en condiciones establecidas de temperatura y humedad

	Probeta	Temperatura	Humedad
AFNOR P15-352	4*4*16 cm	20 °C	50 %
ASTM C 157	2,5*2,5*28,5 cm	23 ± 1,1 °C	50 ± 4%
BS 1881	10*10*50	23 °C	50 %

Limitaciones de los ensayos

- Influencia de variación de las condiciones ambientales

- ✓ Temperatura $\Delta 1\text{ °C}$ → $\Delta 10\text{ m/m}$
- ✓ Humedad $\Delta 10\% \text{ HR}$ → 15% variación $\Delta L/L$

- Influencia de errores en las mediciones

- ✓ 0.01 mm → 60 m/m
- ✓ Exactitud requerida : 10 m/m

- Ensayos indican el valor de la retracción final; no representan su evolución en elementos de dimensiones diferentes a las probetas.

Retracción final se obtiene a 1 mes de edad

Retracción típica de morteros con cementos chilenos (AFNOR):

Corrientes: $\delta f = 900\ \mu/m$

Alta resistencia $\delta f = 1000\ \mu/m$

Estimación retracción hormigón:

Si $c + f = 35\%$ (del volumen absoluto) → $\delta f \approx 300\ \mu/m$ (no es exacto)

δf hormigón proporcional a δf mortero → $\delta f \approx \delta f_{\text{mortero}} \times 300/900\ (\mu/m)$



➤ *Predicción de la Retracción Hidráulica por medio de Ensayos de Laboratorio*

Una mejoría en la exactitud de la predicción de la retracción se obtiene, tomando los resultados de probetas analizadas durante 28 días y luego, extrapolar los datos para obtener los valores de largo plazo. Las siguientes ecuaciones son aplicables tanto para hormigones normales, como para livianos, almacenados en un lugar fresco y seco, a temperatura ambiente:

$$Sh(t, t_0) = Sh_{28} + 100 * [3,61 * \ln(t-t_0) - 12,05]^{1/2}$$

donde:

$Sh(t, t_0)$ = retracción (10-6) a largo plazo, en el tiempo t después de curado a una edad temprana t_0

Sh_{28} = retracción (10-6) después de 28 días

(t, t_0) = tiempo desde que empieza el secado (> 28 días)

El uso de la primera ecuación proporciona un error promedio de un 7 % cuando se compara la predicción a 10 años contra la medición empírica en el mismo tiempo.

El fenómeno inverso o expansión, se predice con una prueba de duración al menos 1 año, para estimar los valores de largo plazo con una razonable exactitud. Esto arroja un error promedio de un 18 % en 10 años. La expresión es la siguiente:

$$Sw(t, t_0) = Sw_{365} B$$

donde:

$$B = 0,377 * [\ln(t-t_0)]^{0,55}$$

$Sw(t, t_0)$ = expansión (10-6) a largo plazo, en el tiempo t después de curado a una edad temprana t_0

Sw_{365} = expansión después de 1 año

(t, t_0) = tiempo desde que empieza la expansión (> 365 días)



MEDIDAS PARA ATENUAR LA RETRACCIÓN HIDRÁULICA

- Usar cementos con baja finura y bajo contenido de C3A y cal libre (Ej. cemento corriente Polpaico).
- Usar áridos con baja porosidad y bajo contenido de finos.
- Usar bajas dosis de agua y de cemento.
- Mantener ambiente saturado el mayor tiempo posible.
- Dimensionar los elementos teniendo en consideración la retracción hidráulica (armaduras mínimas, juntas de contracción).



VARIACIONES DE VOLUMEN CAUSADAS POR CARBONATACIÓN

(RETRACCIÓN POR CARBONATACIÓN)

➤ *Mecanismo De Retracción Por Carbonatación*

- Reacciones hidratación cemento dejan cal libre
- En presencia de humedad CO₂ aire forma ácido carbónico
- Cal libre reacciona con ácido carbónico y produce carbonato de calcio:

$$\text{Ca(OH)}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Ca CO}_3 + \text{H}_2\text{O}$$
- Proceso químico de carbonatación es contractivo

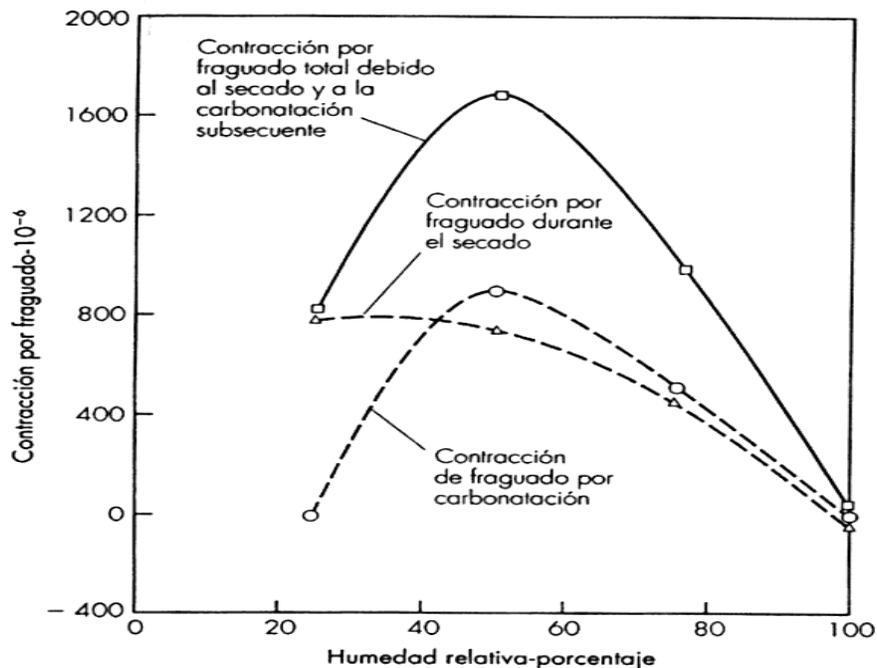


Figura 14. Contracción de fraguado por secado y por carbonatación del mortero a diferentes humedades relativas.



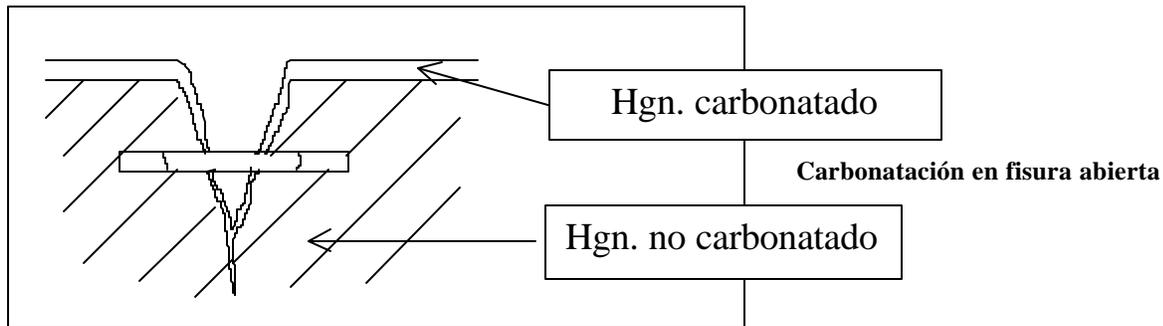
➤ *Características Del Proceso De Carbonatación*

- Espesor afectado es pequeño (sólo pocos milímetros en sup. contacto aire)
 - Velocidad de carbonatación depende de:
 - ✓ Permeabilidad hormigón
 - ✓ Contenido humedad hormigón
 - ✓ Contenido aire CO₂
 - ✓ Humedad relativa ambiente
 - Disminuye en ambiente seco (HR < 25%) o saturado
- Agua impide difusión del CO₂ en los poros del hormigón
Desarrollo de carbonatación requiere cierto grado de humedad mínimo
- Carbonatación mayor en hormigón protegido lluvia y expuesto a aire húmedo, que en hormigón periódicamente lavado por lluvia
 - Caso más negativo: HR ≈ 50%, hormigón superf. seco y poco compacto



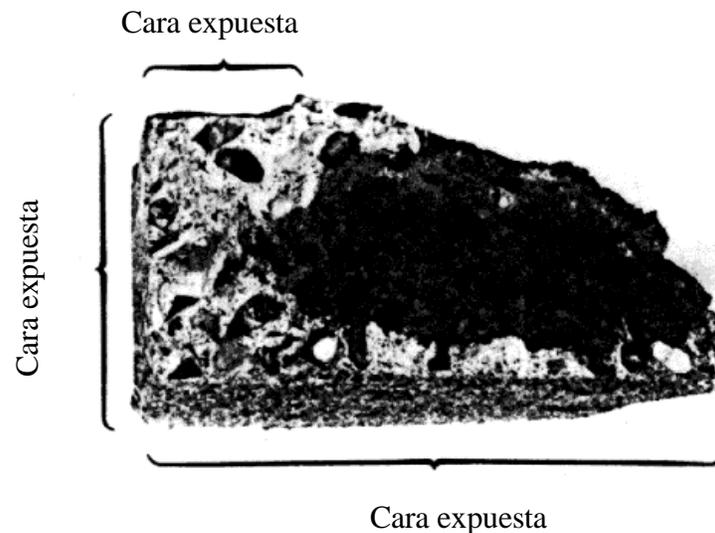
➤ *Efectos De La Carbonatación*

- Contracción superficie produce pequeñas fisuras y hormigón superficial se torna polvoriento
- Importante hormigones sometidos a desgaste ; deterioro es progresivo
- Aumenta levemente la resistencia y reduce permeabilidad del hormigón
- Neutraliza alcalinidad pasta cemento → reduce protección acero a corrosión



➤ *Evaluación*

- Proceso de importancia secundaria, difícil de evaluar
- Extensión de la carbonatación se determina tratando la superficie recién rota con fenolftaleína → Ca(OH)_2 libre se colorea rosado y la sección carbonatada no se colorea.





➤ **Recomendación**

Prolongar período de curado al máximo
Usar baja razón W/C



VARIACIONES DE VOLUMEN CAUSADAS POR LA TEMPERATURA

(RETRACCIÓN TÉRMICA)

➤ *Causas De Producción*

- Variaciones de temperatura externa → **medio ambiente**
- Variaciones de temperatura interna → **calor de hidratación**
- Ambas causas **se superponen** por ser independientes en su generación

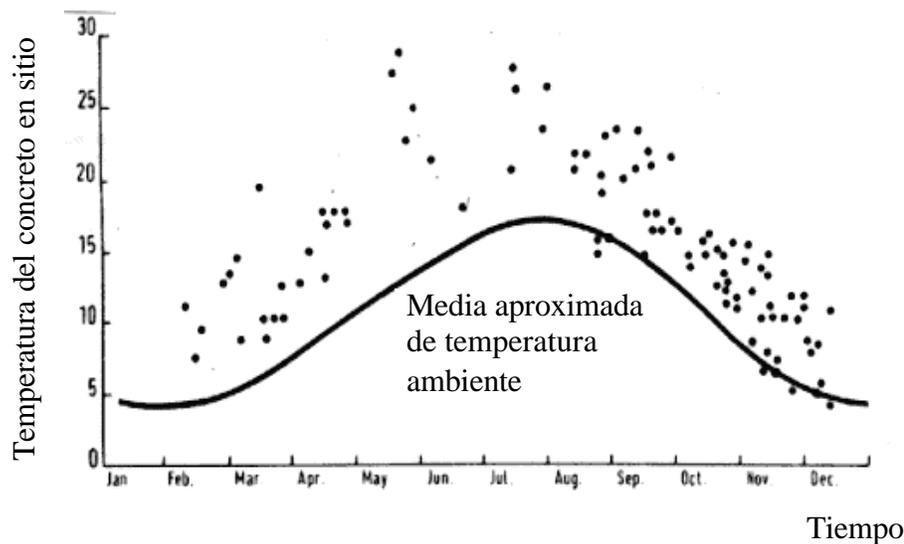


Figura 15. Temperaturas del hormigón en terreno, periodo 1962-1964

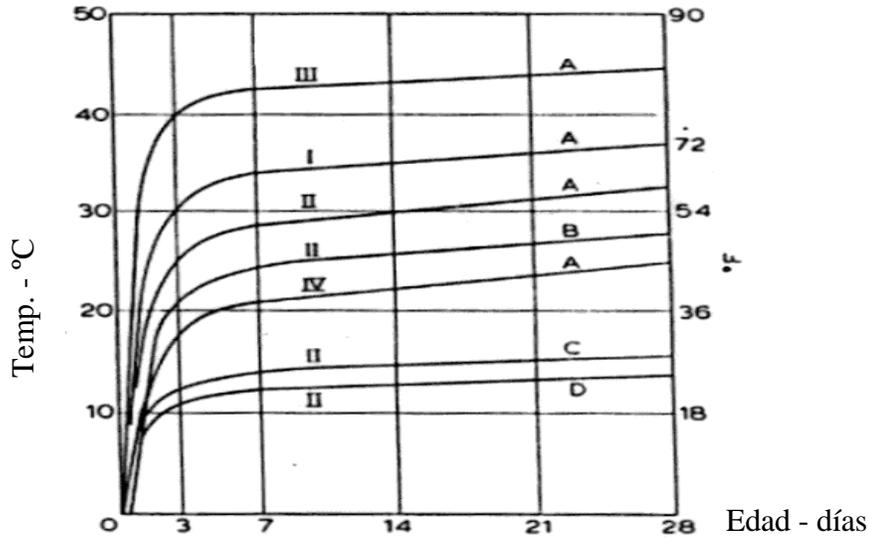


Figura 16. Incremento de la tº del hormigón para distintos cementos.

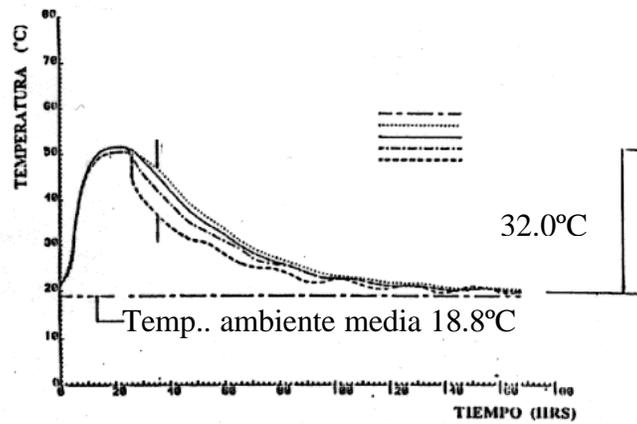
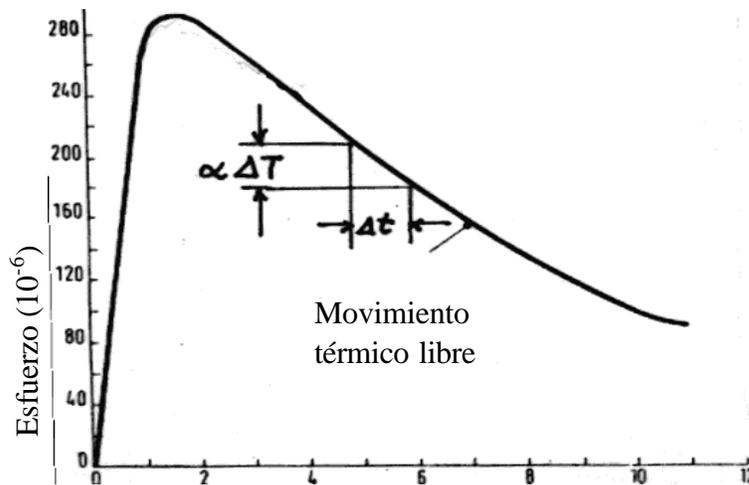


FIGURA GRAFICOS TEMPERATURA PROMEDIO HORMIGON - TIEMPO

Figura 17. gráficos de temperatura promedio hormigón - tiempo





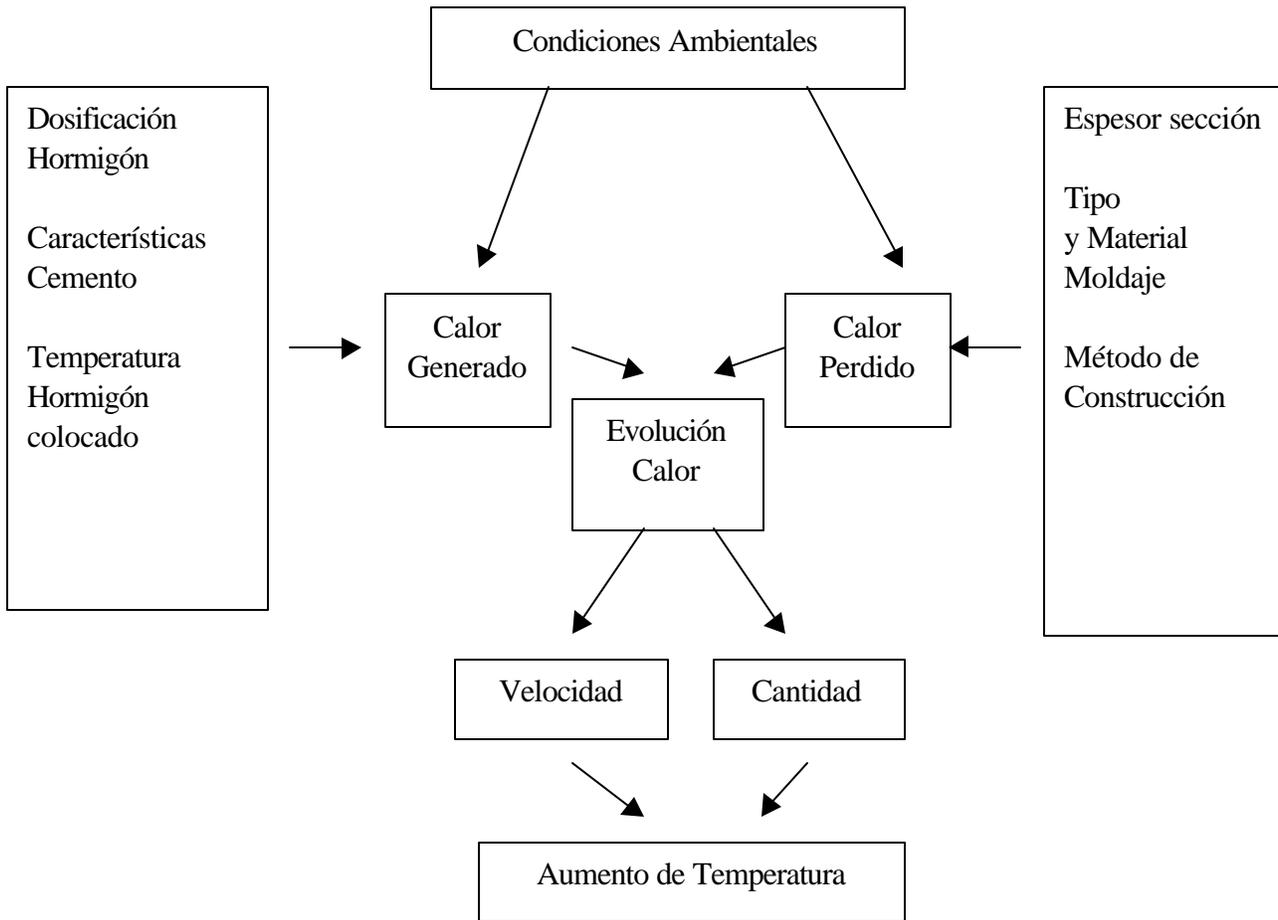
• PRINCIPALES FACTORES QUE CONDICIONAN LA RETRACCIÓN TÉRMICA

Variaciones derivadas de causas externas

- Magnitud de las variaciones de temperatura ambiente
A mayor peak temperatura ambiente, mayor peak temperatura del hormigón
- Velocidad de variación de la temperatura ambiente
A mayor período del ciclo térmico, mayor es la profundidad afectada (caso crítico)

Variaciones por causas internas

- Características del cemento
 - Tipo de cemento (contenido C3A)
 - Finura de molienda
 - Temperatura inicial en el momento de su incorporación en el hormigón.
A veces llegan a obra con temperatura de 50 a 60 °C
- Dosis cemento del hormigón y uso materiales reemplazo cemento
- Temperatura del hormigón colocado
- Espesor de la sección
- Tipo de moldaje y aislación
- Método y secuencia de construcción



➤ *Efecto del Tipo y Dosis de Cemento*

Tabla 2. Ejemplos de calor total de hidratación para cinco cementos Pórtland corrientes.

Tiempo a 20°C	Calor total de hidratación (KJ/Kg)				
	Cemento A	Cemento B	Cemento C	Cemento D	Cemento E
6h	25	14	35	32	27
12h	85	45	99	97	83
18h	118	78	146	135	121
24h	139	107	181	158	148
3 días	242	218	298	227	259
7 días	314	291	350	262	312



Tabla 3. Rangos de temperatura ascendentes sobre la temperatura media ambiental (°C) para hormigones OPC.

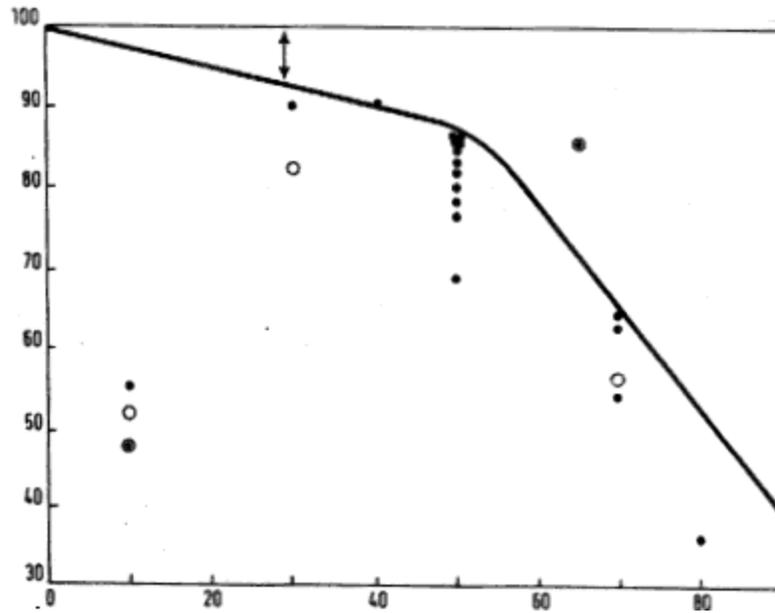
Espesor sección (mm)	Moldaje acero Contenido cemento Kg/m ³				Moldaje madera terciada Contenido cemento Kg/m ³			
	220	290	360	400	220	290	360	400
≤300	5-7	7-10	9-13	10-15	10-14	14-19	18-26	21-31
500	9-13	13-17	16-23	19-27	15-19	20-27	27-36	31-43
700	13-17	18-24	23-33	27-39	18-23	25-32	34-43	40-49
≥1000	18-23	24-32	33-43	39-49	22-27	31-37	42-48	47-56

Tabla 4. Rangos de temperatura ascendentes sobre la temperatura media ambiental (°C) para hormigones SRPC.

Espesor sección (mm)	Moldaje acero Contenido cemento Kg/m ³				Moldaje madera terciada Contenido cemento Kg/m ³			
	220	290	360	400	220	290	360	400
≤300	5-6	6-8	7-10	8-11	9-11	12-15	15-19	17-22
500	8-10	11-14	14-18	15-20	12-15	16-20	21-27	23-31
700	11-14	15-18	19-23	21-27	15-18	19-25	25-33	28-38
≥1000	15-18	19-24	24-32	28-37	17-22	23-30	30-40	34-45



➤ *Efecto de Materiales de Reemplazo del Cemento*





➤ **Efecto del Espesor de la Sección**

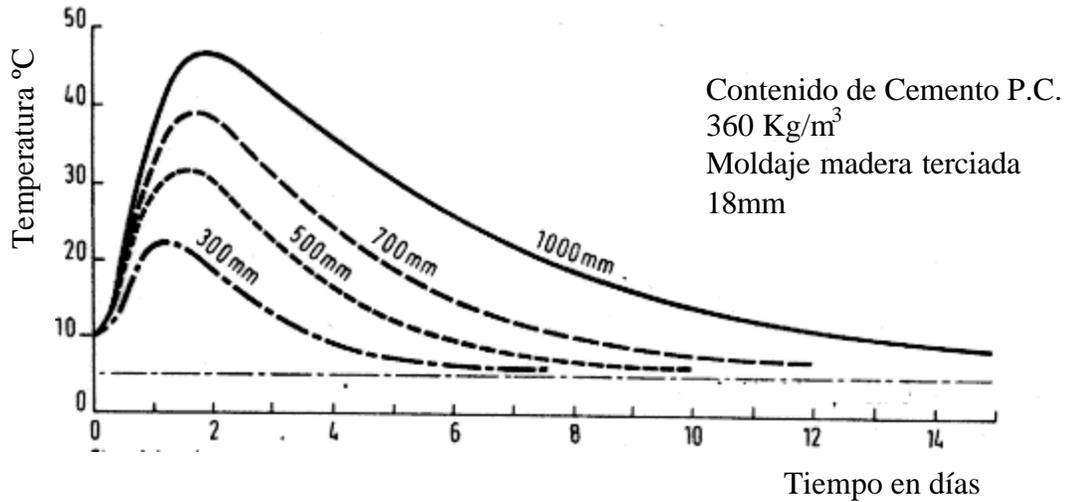


Figura 18. Efecto del espesor de la sección en el incremento de temperatura en muros

➤ **Efecto del Tipo de Moldaje y Aislación**

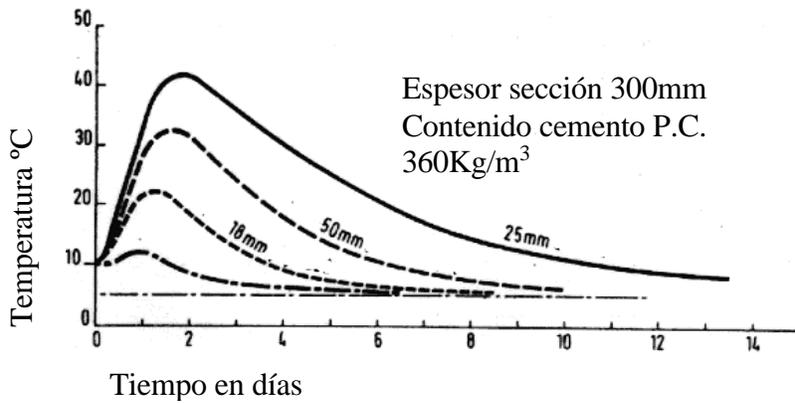


Figura 2. Efecto del tipo de moldaje en el incremento de temperatura en muros.

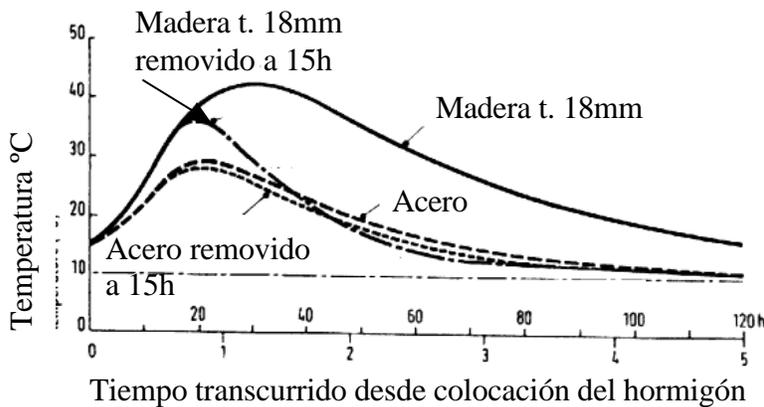


Figura 1. Efecto del material de moldaje en el peak de temperatura



• EVALUACIÓN DE LA RETRACCIÓN TÉRMICA

➤ *Determinación de las deformaciones unitarias:*

$$\Delta L = \alpha \Delta T L \rightarrow \epsilon_T = \alpha (\Delta T)_m$$

α = Coeficiente dilatación térmica hormigón (10-5/oC)
 $(\Delta T)_m$ = variación media de temperatura
 ➔ depende de: - valor temperaturas producidas
 - características de dilatación térmica

➤ *Determinación de la temperatura del hormigón fresco recién mezclado:*

- Materiales a temperatura normal

$$T_i (\text{°C}) = \frac{(0,22 (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa})}{(0,22 (W_a + W_c) + W_w + W_{wa})}$$

- Enfriamiento del hormigón fresco con hielo como parte del agua de amasado

$$T_i (\text{°C}) = \frac{(0,22 (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + T_a W_{wa} - L w_i)}{(0,22 (W_a + W_c) + W_w + W_{wa} + W_i)}$$

- Caso de áridos congelados

$$T_i (\text{°C}) = \frac{(0,22 (T_a W_a + T_c W_c) + T_w W_w + W_{wa}(0,5 T_a - L))}{(0,22 (W_a + W_c) + W_w + W_{wa})}$$

con: T = temperatura (°C)

W = masa de los componentes por unidad de volumen hormigón (kg/m³)

a,c,w,wa,i = árido seco, cemento, agua libre líquida, agua absorbida por árido, hielo

0,22 = razón entre calor específico de componentes secos y agua

L = razón entre calor latente de fusión del hielo (335 kJ/kg) y el calor específico del agua (4,2 kJ/kg/°C), equivalente a 80 °C

0,5 = razón entre calor latente de fusión del hielo y agua



➤ **Determinación de la elevación de temperatura adiabática del hormigón debido al calor de hidratación**

$$\Delta T (^{\circ}\text{C}) = (\Delta Q \times C) / (c \times \gamma)$$

con: ΔQ = variación calor de hidratación cemento en tiempo Δt (kcal/kg)

C = dosis de cemento del hormigón (kg/m³)

c = calor específico hormigón (cantidad de calor que absorbe el material);

$c \approx 0,24$ (kcal/kg x $^{\circ}\text{C}$)

γ = densidad del hormigón $\approx 2,40$ a $2,45$ (kg/dm³)

➤ **Determinación de la distribución de temperaturas**

Ley general: LEY DE FOURIER

$$(\partial T / \partial t) = (k / c\gamma) \{ (\partial^2 T / \partial x^2) + (\partial^2 T / \partial y^2) + (\partial^2 T / \partial z^2) \}$$

con: T = temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

t = tiempo (h)

x, y, z = coordenadas (m)

k = conductividad (resistencia del material al paso del flujo calórico)

$k \approx 2,25$ (kcal/h x m x $^{\circ}\text{C}$)

c = calor específico (cantidad de calor que absorbe el material)

$c \approx 0,24$ (kcal/kg x $^{\circ}\text{C}$)

γ = densidad $\approx 2,40$ a $2,45$ (kg/dm³)

Difusividad: medida de capacidad de un material de acumular o disipar calor

$h^2 = (k / c\gamma) \approx 4 \times 10^{-3}$ (m²/h)

Métodos de cálculo:

- Elementos Finitos → Computador: Métodos de Wilson y de Polivka y Wilson (U. de California, Berkeley)



- Método Aproximado: **Métodos de Schmidt** y de Carlson
 - Dividir elemento en partes de longitud ΔL en sentido del flujo calórico
 - Fijar unidad de tiempo de cálculo: $\Delta t = \frac{1}{2} \frac{(\Delta L)^2}{h^2}$
 - Se cumple **Ley de variación de temperaturas** en función del tiempo

$$T_2' = T_2 + \left(\frac{h^2 \Delta t}{(\Delta L)^2} \right) (T_1 + T_3 - 2 T_2)$$

$$\text{Si } \left(\frac{h^2 \Delta t}{(\Delta L)^2} \right) = \left(\frac{1}{2} \right) \rightarrow T_2' = \left(\frac{1}{2} \right) (T_1 + T_3)$$

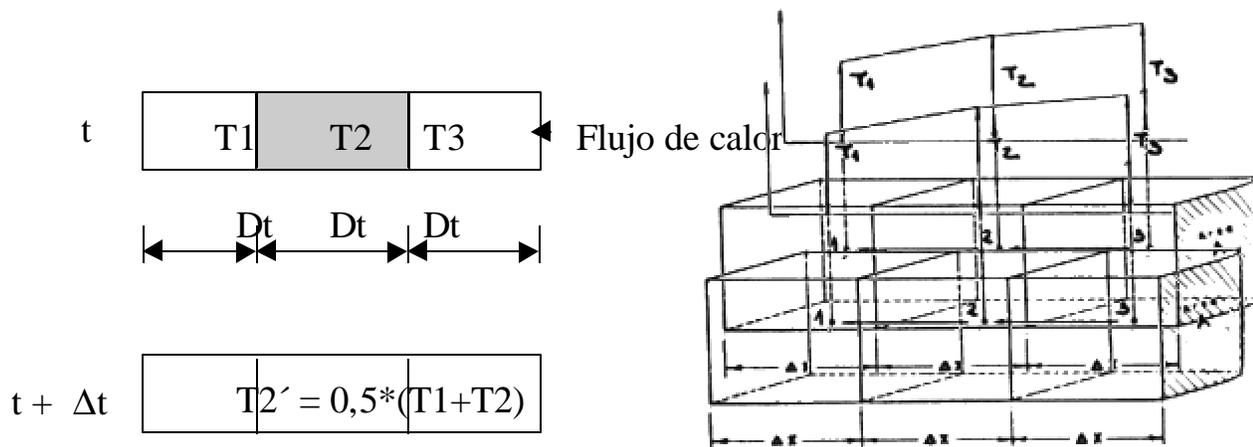


Figura 19. Cálculo de la Evolución de Temperatura por el Método Schmidt

➤ *Cálculo temperatura media a partir de distribución temperaturas.*

Determinación de las deformaciones unitarias:

$$(\Delta T)_m = T_m - T_{amb} = \frac{1}{L} \int_0^L ((T_x - T_{amb}) dx) = \frac{1}{L} \int_0^L (\Delta T_x dx) = \left(\sum \Delta T_x / n \right)$$

➤ *Coefficiente de dilatación térmica del hormigón*

Depende de:



- la naturaleza de los áridos (particularmente aquellos de constitución caliza; poco común en Chile)
- estado humedad de la pasta cemento

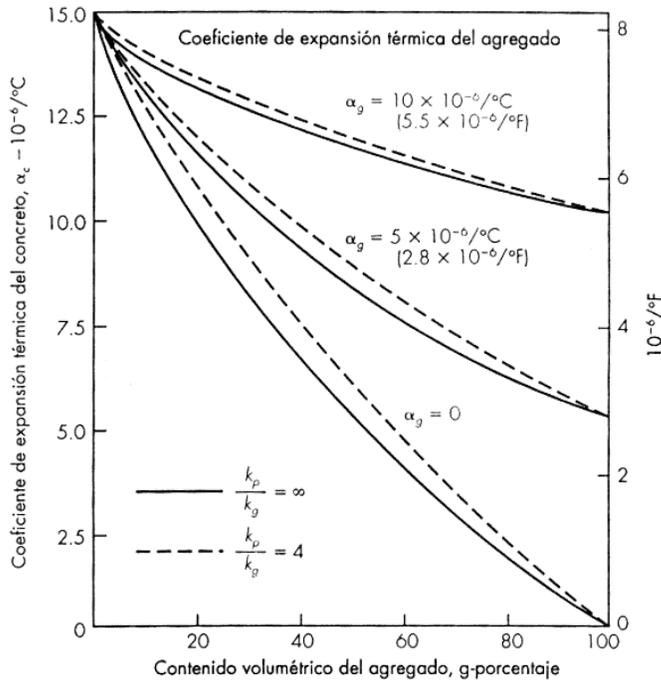


Figura 20. Influencia del contenido volumétrico del agregado y del tipo de agregado en un coeficiente lineal de expansión térmica del concreto, usando la ec.

$$a_c = a_p - 2g(a_p - a_g)$$

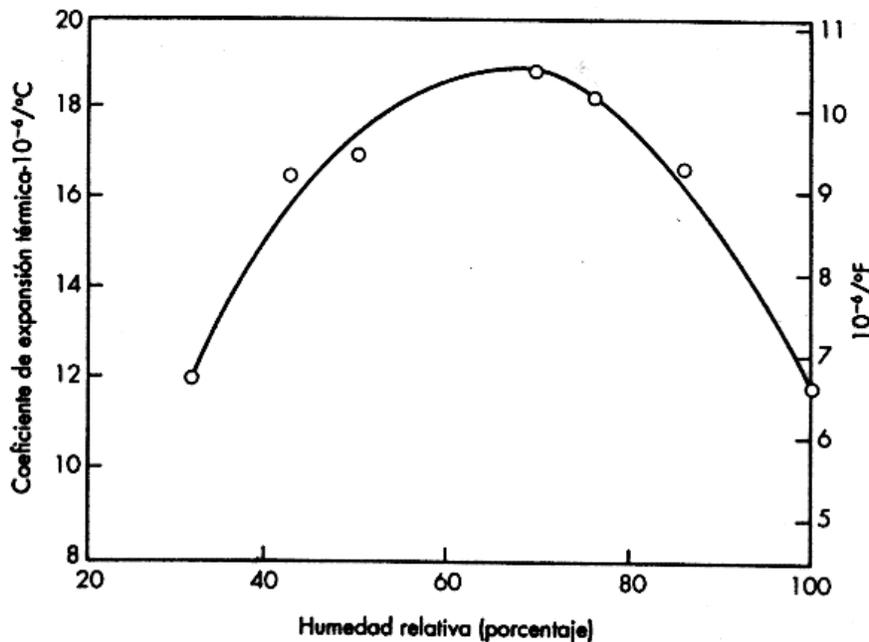


Figura 21. Relación entre la humedad relativa ambiental y el coeficiente lineal de expansión térmica de la pasta de cemento pura curada normalmente.

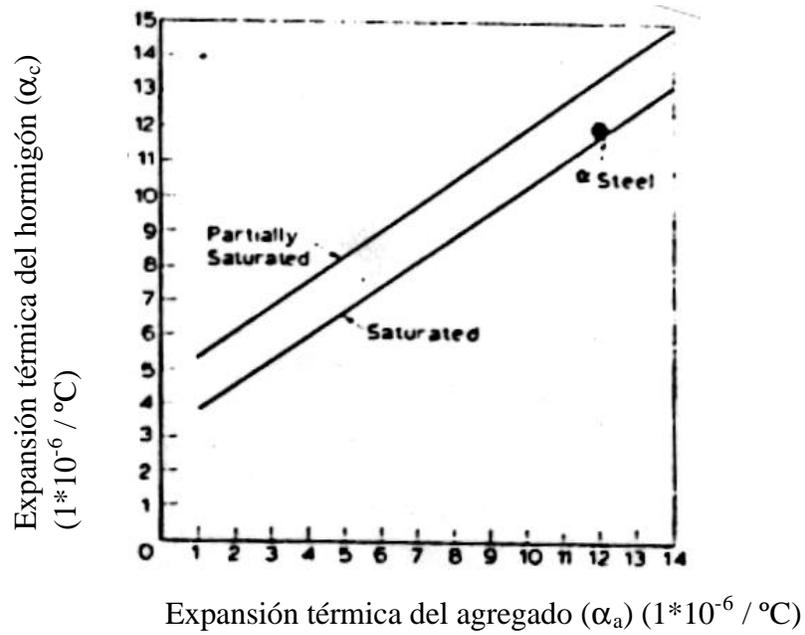


Figura 22. Expansión térmica del hormigón v/s agregado



Ejemplo aplicación método Schmidt

1. Muro espesor 2 m.
2. Dosificación hormigón: $C = 200 \text{ kg/m}^3$
3. Calor hidratación cemento

t (horas)	0	12	24	36	48	72	120	144
Q (kg.cal/kg)	0	35	55	60	62	65	66	67

4. Elevación temperatura (adiabática, sin pérdida de calor)

$$\Delta T (^{\circ}\text{C}) = (\Delta Q \times C/c \times \gamma) = (\Delta Q \times 300/0,24 \times 2400) = 0.521 \Delta Q \text{ (kg.cal/kg)}$$

5. Elección Δt , ΔL

$$h_2 = 4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{h} \quad \Delta L \text{ (m)} \quad \Delta t \text{ (hr)} = \Delta L^2/2 h_2$$

0,05	0,31
0,10	1,25
0,20	5,00 ← Valor elegido

Evolución de temperaturas (Suponer temp. ambiente = 0 °C; Extremos se mantienen a temperatura ambiente)

t (hr)	ΔL (m)											
	0	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00	1,20	1,40	1,60	1,80	2,00	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	$\Delta\theta_1 <$	Elevación temp. cuerpo aislado = 7.6 [=0,521*35/12*5] \rightarrow										
	θ_1'	0	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	0
	θ_1	0	3.8	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	7.6	3.8	0
10	$\Delta\theta_2 <$	\rightarrow 7.6 \rightarrow										
	θ_2'	0	11.4	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	0
	θ_2	0	7.6	13.3	15.2	15.2	15.2	15.2	15.2	13.3	7.6	0
15	$\Delta\theta_3 <$	\rightarrow 5.6 [= 0,521*(35/12*2 + 20/12*3)] \rightarrow										
	θ_3'	0	13.2	18.9	20.8	20.8	20.8	20.8	20.8	18.9	13.2	0
	θ_3	0	9.5	17.0	19.9	20.8	20.8	20.8	19.9	17.0	9.5	0
20	$\Delta\theta_4 <$	\rightarrow 4.3 [=0,521*20/21*5] \rightarrow										
	θ_4'	0	13.8	21.3	24.2	25.1	25.1	25.1	24.2	21.3	13.8	0
	θ_4	0	10.6	19.0	23.2	24.7	25.1	24.7	23.2	19.0	10.6	0
25	$\Delta\theta_5 <$	\rightarrow 3.7 \rightarrow										
	θ_5'	0	14.3	22.7	26.5	28.4	28.8	28.4	26.9	22.7	14.3	0
	θ_5	0	11.3	20.4	25.5	27.7	28.4	27.7	25.5	20.4	11.3	0
30	$\Delta\theta_6 <$	\rightarrow 1.1 \rightarrow										
	θ_6'	0	12.4	21.5	26.6	28.8	29.5	28.8	26.6	21.5	12.4	0
	θ_6	0	10.8	19.5	25.2	28.0	28.8	28.0	25.2	19.5	10.8	0
35	$\Delta\theta_7 <$	\rightarrow 1.1 \rightarrow										
	θ_7'	0	11.6	20.6	26.3	29.1	29.9	29.1	26.3	20.6	11.6	0



	θ7	0	10.3	19.0	24.9	28.1	29.1	28.1	24.9	19.0	10.3	0
40	Δθ8	←					0.6					→
	θ8'	0	10.9	19.6	25.5	28.7	29.7	28.7	25.5	19.6	10.9	0
	θ8	0	8.3	18.2	24.2	27.6	28.7	27.6	24.2	18.2	8.3	0
45	Δθ9	←					0.4					→
	θ9'	0	8.7	18.6	24.6	28.0	29.1	28.0	24.6	18.6	8.7	0
	θ9	0	9.3	16.7	23.3	26.9	28.0	26.9	23.3	16.7	9.3	0



➤ Mecanismo De Agrietamiento Térmico Del Hormigón

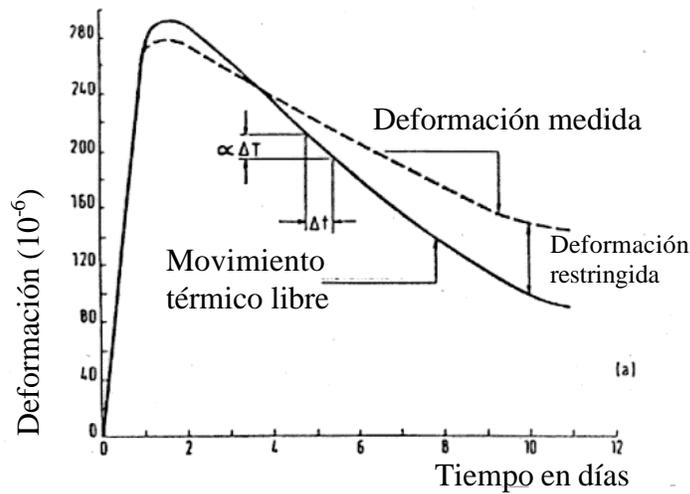
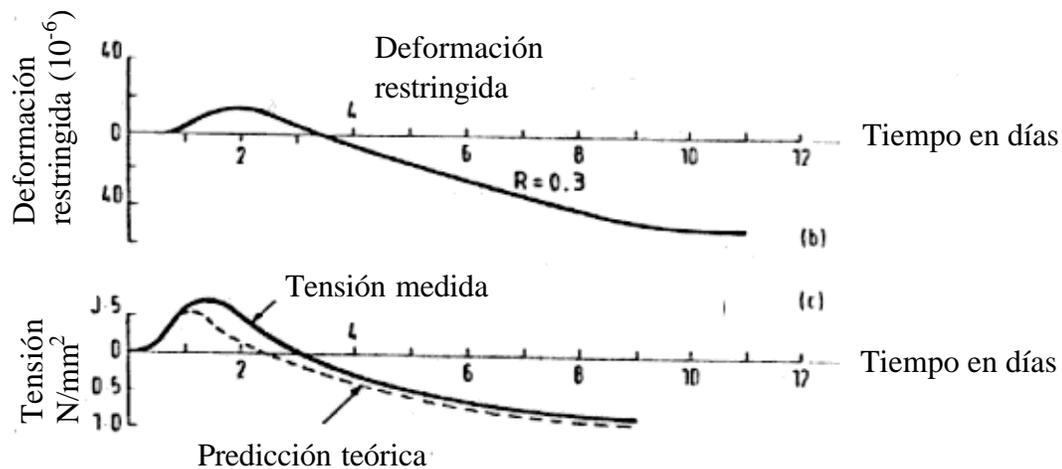


Figura 23. Surgimiento de tensiones y deformaciones como resultado de un temprano movimiento térmico en el centro del vaciado del hormigón masivo



Suposición:

Hormigón fragua a su máxima temperatura sin ninguna tensión inducida

- ➔ se generan tensiones de tracción durante fase enfriamiento y se desprecian las tensiones de compresión iniciales



Se producirá agrietamiento:

Criterio de resistencia: si las tensiones de tracción son mayores que la resistencia a tracción

$$f_{ct} = R \alpha \sum_{t=0}^{t=t1} \Delta T E'c(t) \geq * f_{ct}$$

Criterio de deformación unitaria límite:

si las deformaciones restringidas inducidas durante período de enfriamiento son mayores que la capacidad de deformación a tracción del hormigón

$$R \alpha \Delta T \geq \epsilon_{ult}$$

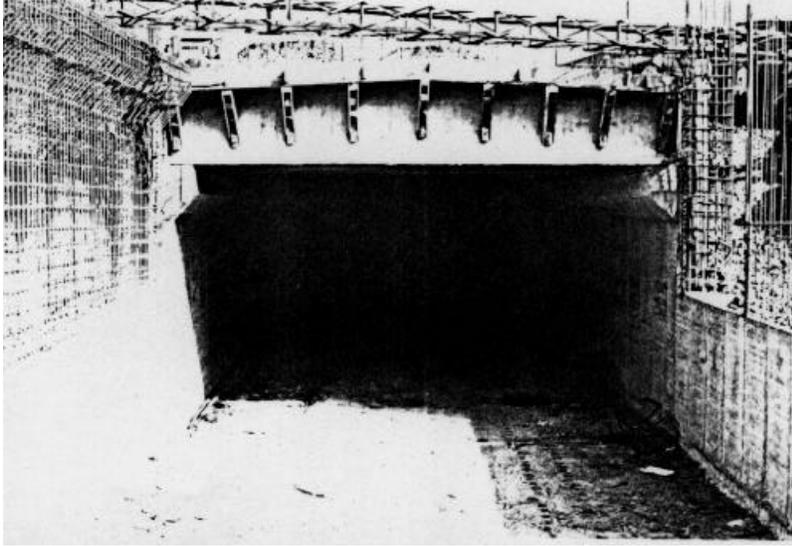
r = factor de restricción movimiento = $\epsilon_r/\epsilon_{th} \leq 1$ (r = 1 por seguridad)

Tabla 5. Valores recomendados capacidad de deformación hormigón ult

Tipo de árido	Secciones delgadas (Enfriamiento rápido)	Secciones gruesas (Enfriamiento lento)
Rodado	65 * 10-6	130 * 10-6
Chancado	90 * 10-6	180 * 10-6
Liviano	200 * 10-6	400 * 10-6

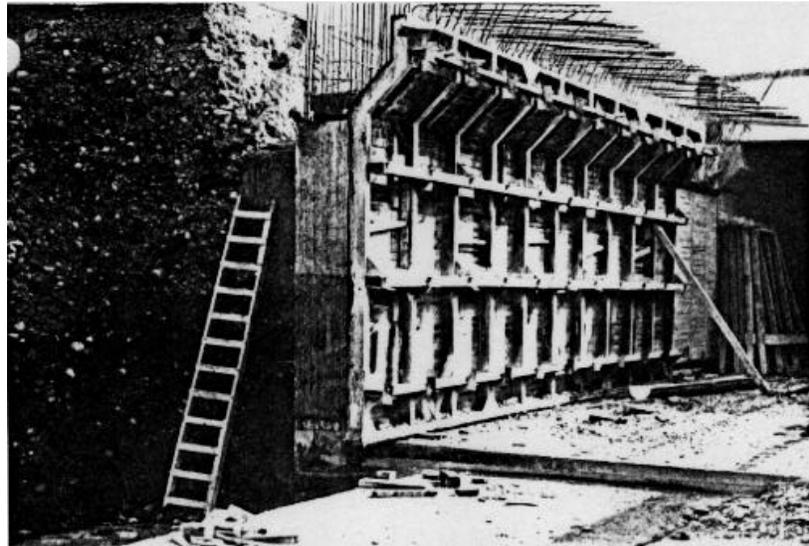


➤ *Agrietamiento Termico Y Por Retracción*

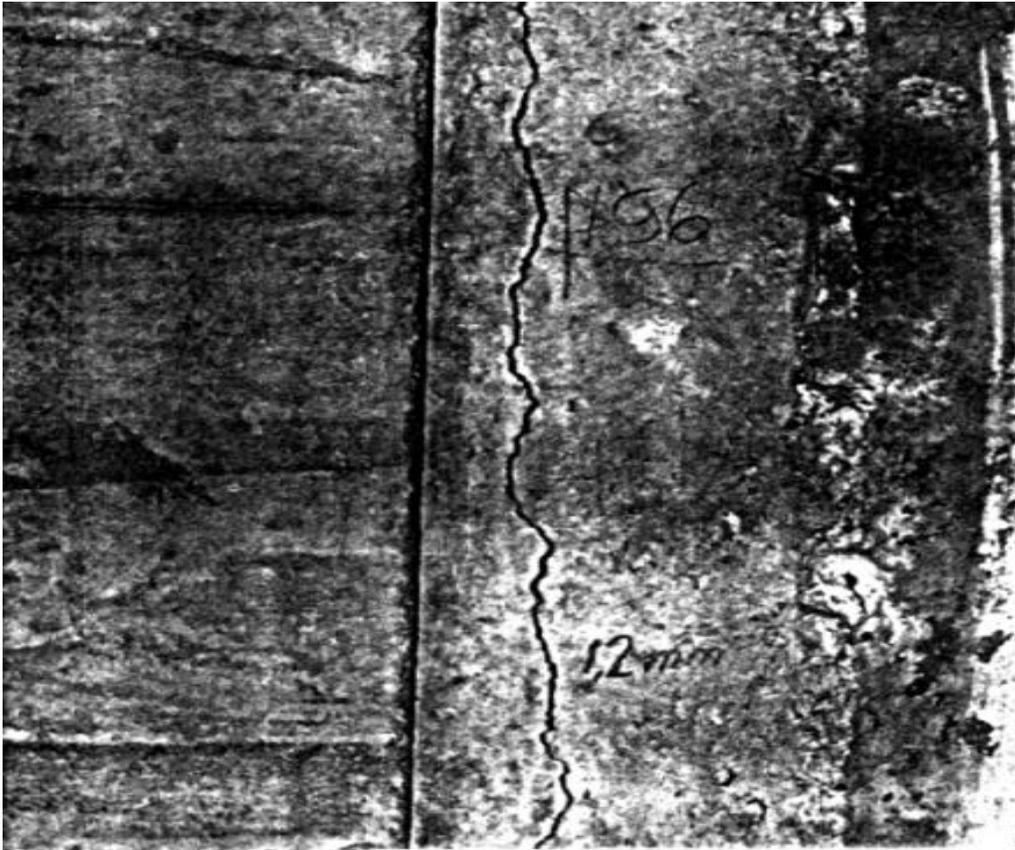


Obra: Metro Santiago
 Hormigón: $f_c=21\text{Mpa}$ (ACI318)
 Acero: A63-42H
 Armadura Vertical Recub.
 Int. $\phi 22 @ 150$ 20 mm
 Ext. $\phi 16 @ 200$ 40 mm
 Armadura horiz. Cuantía
 $\phi 12 @ 200$ 2,5 0/00
 Ambas caras

Sección del muro
 450 x 3200 x 10000 mm



Grietas			
	Promedio	Max.	Min.
Nº de grietas	6.3	12	1
Ancho grietas	0.25	1.3	
Ancho máx. grietas	0.59	1.3	0.16
Espaciamiento grietas	1671	10260	190
Espaciamiento máx.	3156	10260	1120
Espaciamiento min.	1484	10260	190





➤ (Cont. Mecanismos de Agrietamiento Térmico del Hormigón)

Restricción externa

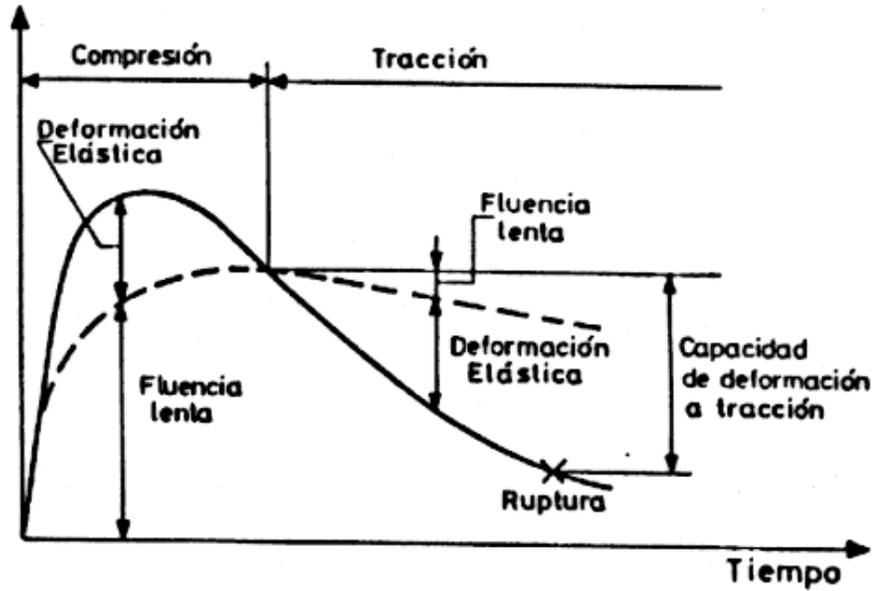


Figura 24. Distribución de deformaciones unitarias potenciales en un elemento delgado de hormigón externamente restringido durante el endurecimiento

Restricción interna

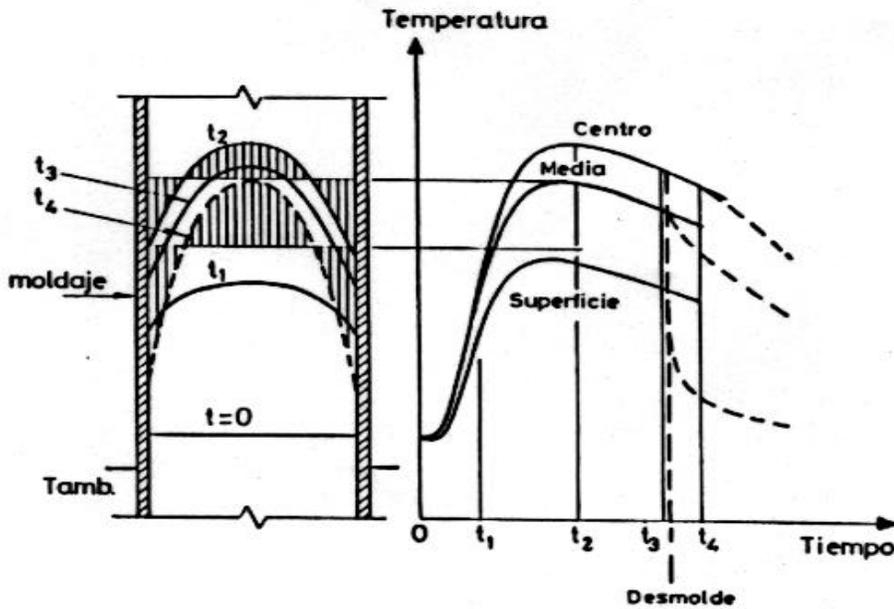
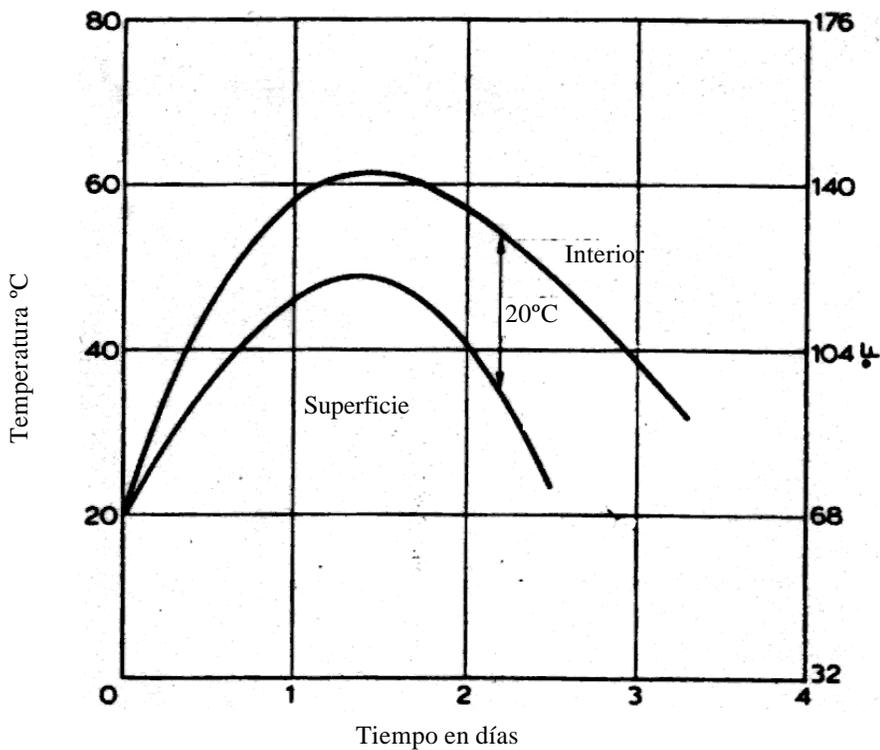
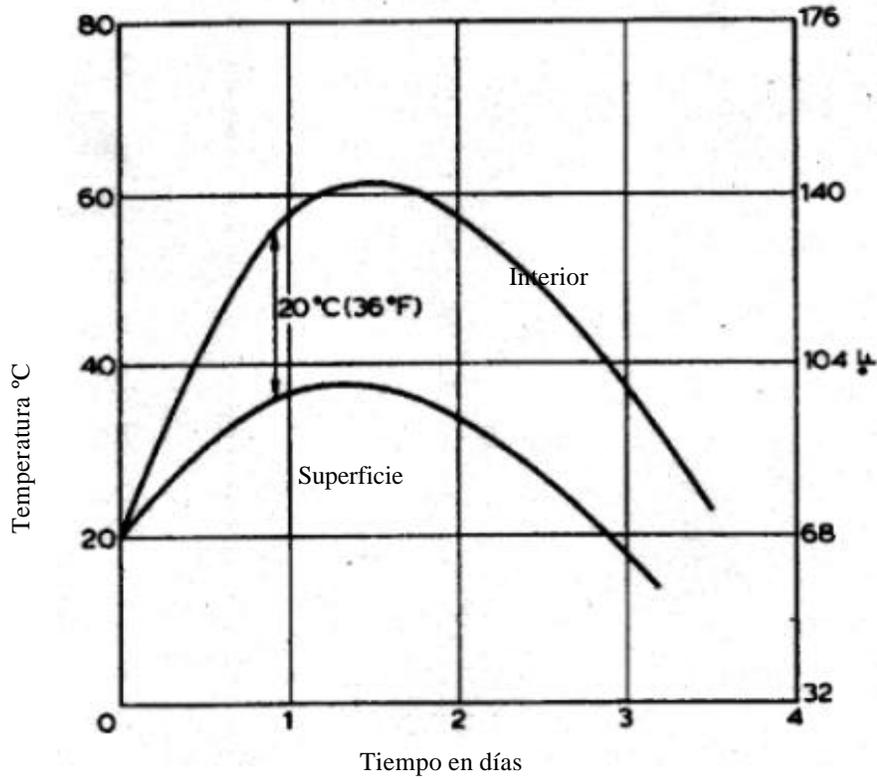




Figura 25. Distribución de temperaturas y su desarrollo en el tiempo, para un muro grueso de hormigón durante el endurecimiento.

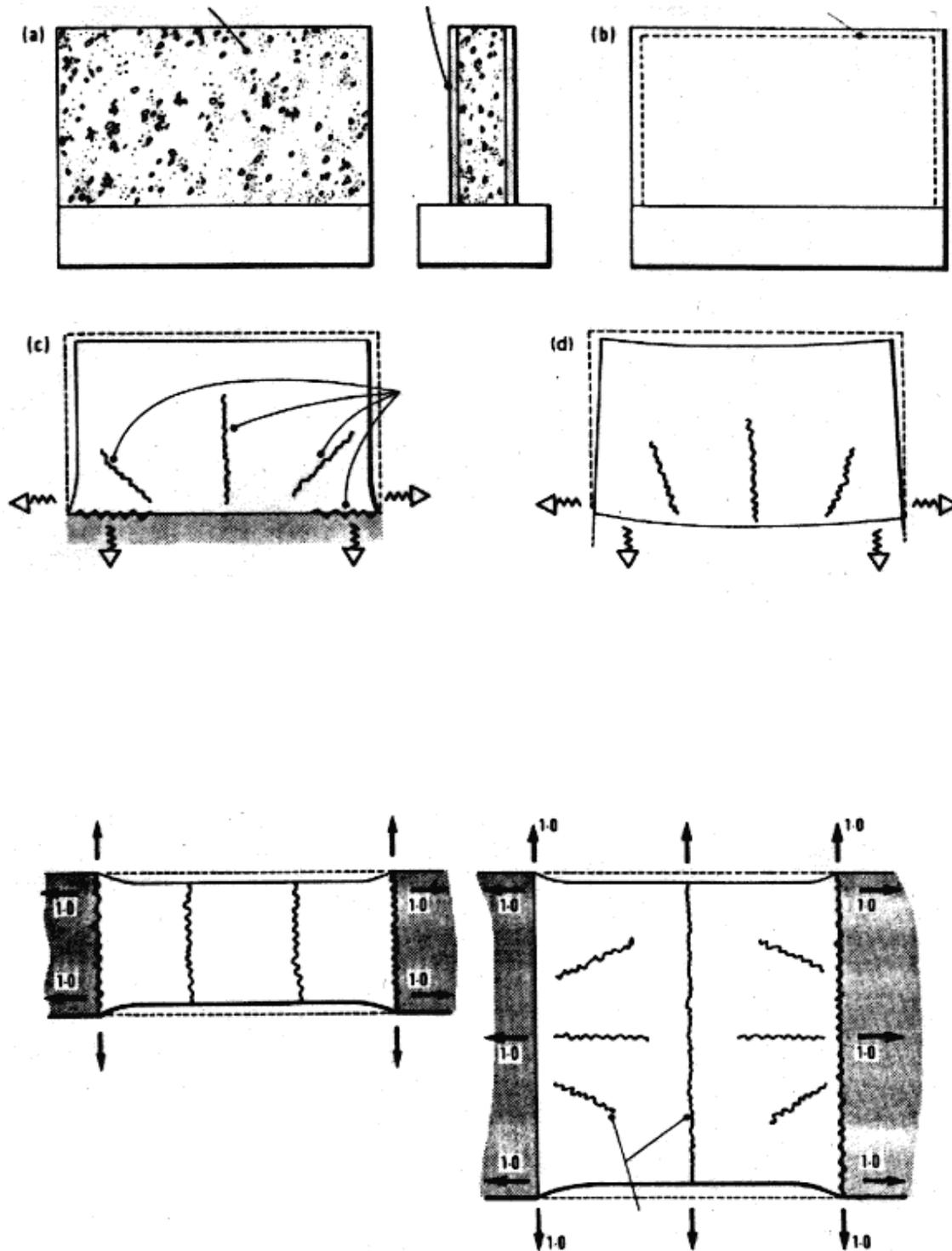


Criterio Diferencia Máxima De Temperatura En Elementos Masivos



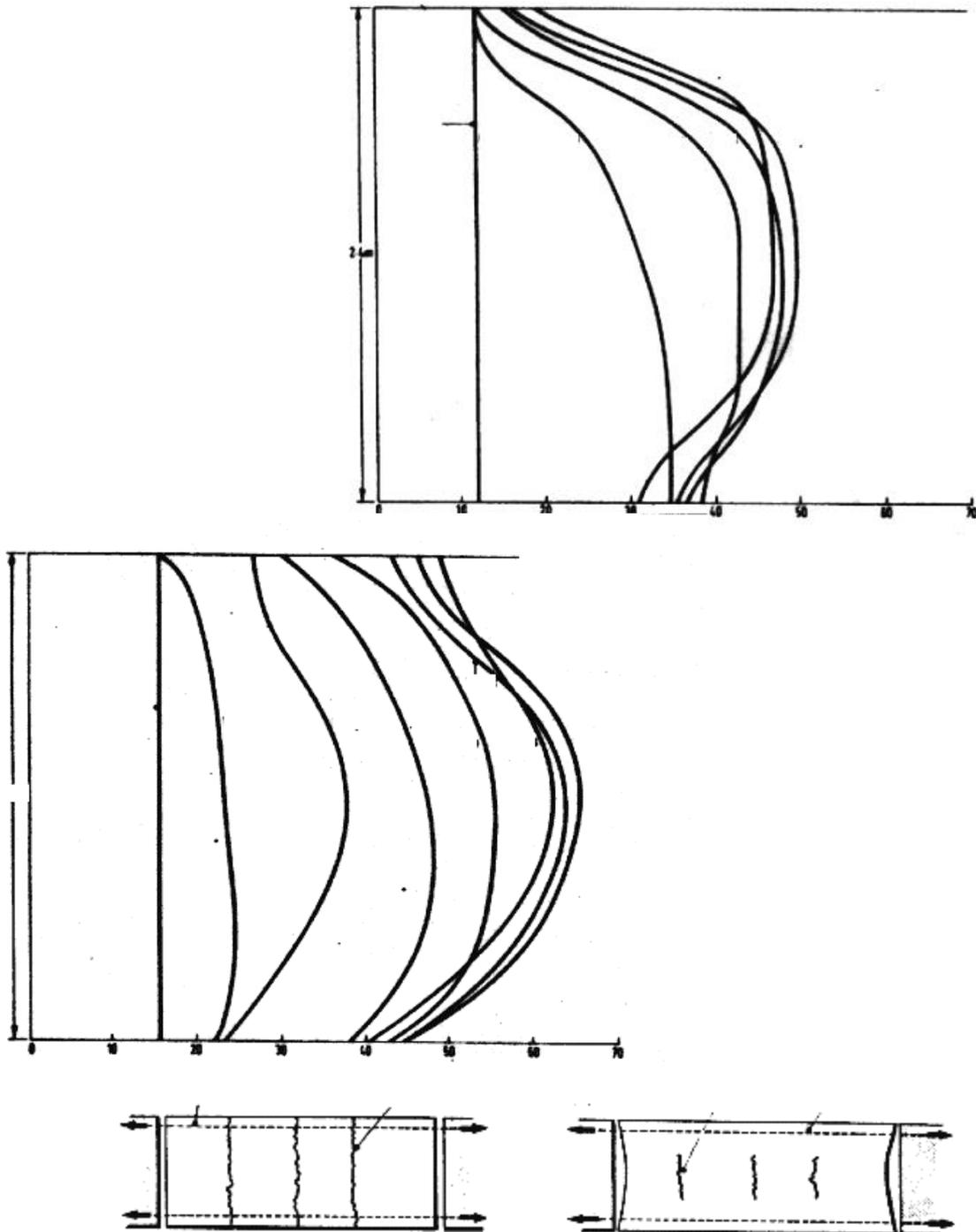


➤ *Efecto Del Tipo De Restricción En El Agrietamiento Térmico Del Hormigón*



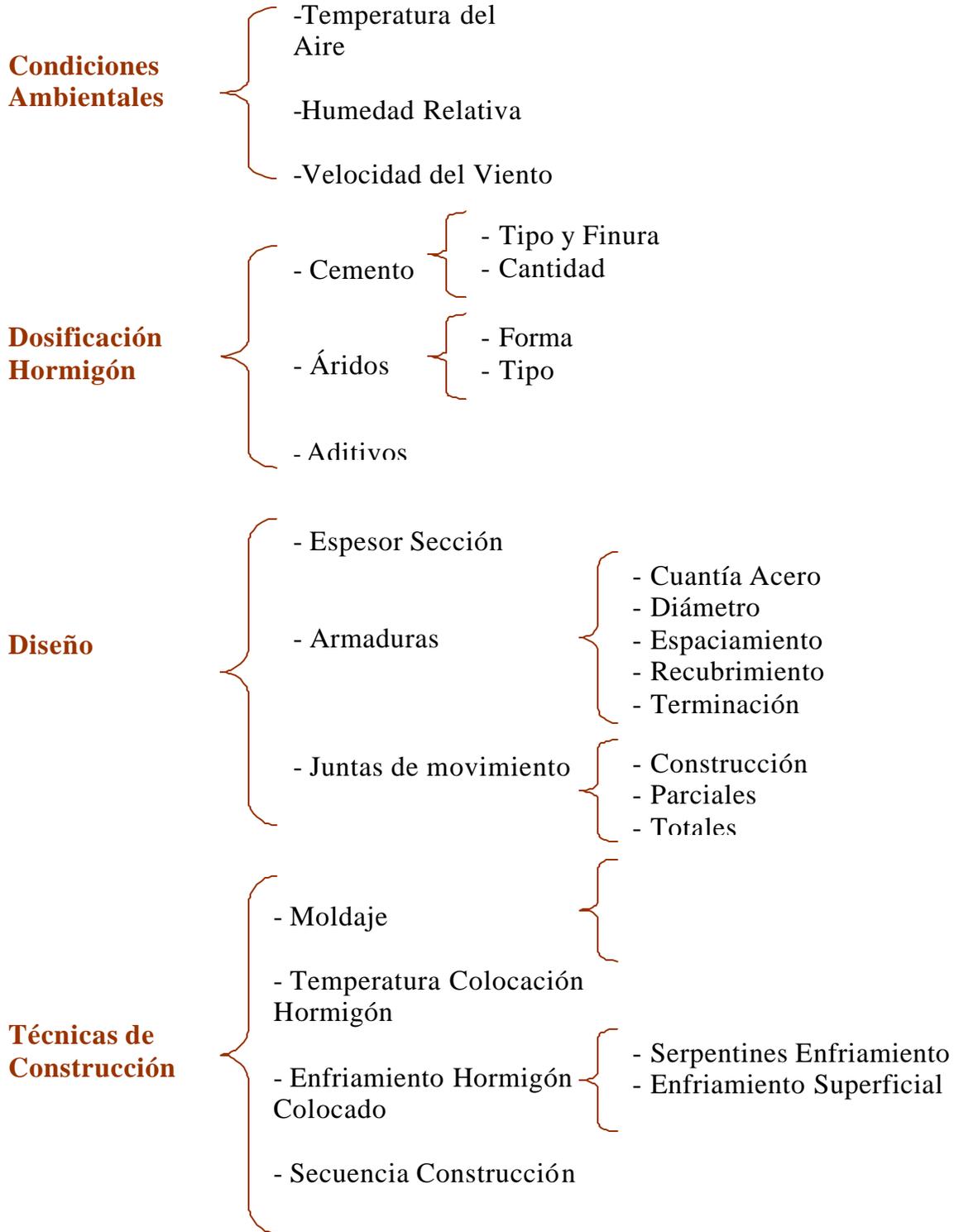


➤ **Restricción Interna**





➤ Factores Que Afectan El Agrietamiento Térmico Del Hormigón





➤ *Medidas Para Atenuar Efectos De La Retracción Térmica*

Retracción por temperaturas externas:

 **Aislación térmica en paramentos externos**

Retracción por temperaturas internas:

 **Disminución de temperaturas producidas por calor de hidratación**

✓ **Empleo cementos bajo calor hidratación:**

< 70 cal/gr a 7 días: Todos los cementos chilenos en especial los corrientes

✓ **Disminución de temperatura interna del hormigón:**

- Emplear bajas dosis de cemento

- **Aumentar tamaño máximo de los áridos**

- Reemplazar parte cemento por adiciones hidráulicamente activas (puzolanas, cenizas volantes, etc.)

- **Emplear aditivos plastificantes e incorporadores de aire**

- Enfriar previamente áridos y agua

- Reemplazar parte agua de amasado por hielo durante revoltura (baja temp. inicial del hormigón 15 °C)

- Refrigeración del hormigón colocado por circulación agua fría a través de serpentines embebidos en su masa y ubicados a 1,5 a 2,5 m de distancia (agua natural y fría bajan el peak en 3 y 10 °C, respectivamente)



✓ **Planificación de las etapas de hormigonado:**

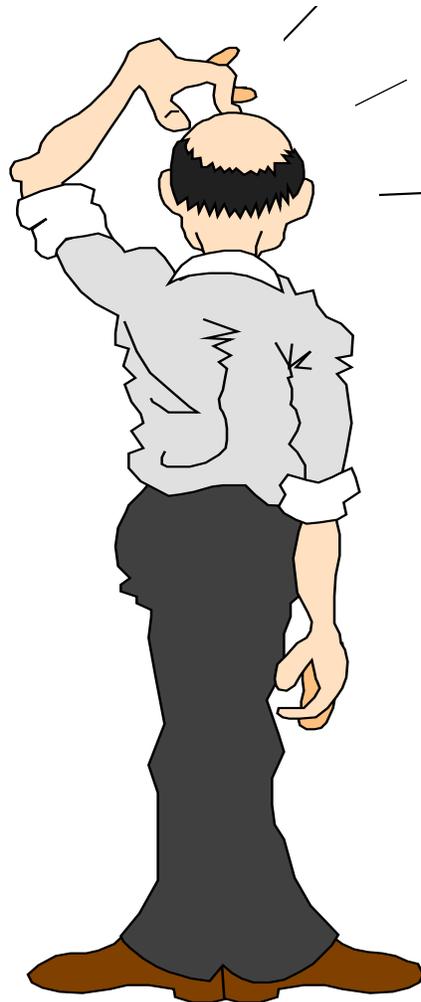
- Disminución de espesores

- Aumento de plazos de espera entre etapas.

Procedimiento habitual: relacionar el espesor de la etapa con el tiempo de espera, de modo que transcurra un plazo de 1 día por cada 50 cm de altura de etapa



Dosificación de Hormigones





INDICE

CONSIDERACIONES BASICAS SOBRE DOSIFICACION 4

- OBJETIVO 4
- CONDICIONES GENERALES PARA DOSIFICACION 4
- PARTICIPANTES 5

METODOS DE DOSIFICACION 6

- DIAGRAMA DE DOSIFICACIÓN 7
- DOSIFICACION APROXIMADA 8
- METODO INGLES (DICTUC Y NCH170 OF.85) 10
 - Diagrama de Flujo del Método de Dosificación 10
 - Elección del Grado de Hormigón 11
 - Cálculo de la Resistencia Media de Dosificación 13
 - Determinación de la Razón Agua/Cemento 17
 - Elección de la Trabajabilidad 21
 - Elección del Tamaño Máximo Nominal del Árido 22
 - Dosis de Agua 24
 - Dosis de Cemento 27
 - Dosis de Aire 28
 - Densidad del Hormigón Fresco Compactado 29
 - Dosis de Áridos 31
 - Bandas granulométricas recomendadas 32
 - Métodos para el proporcionamiento de los áridos 39
 - Formulario de Dosificación (Método Inglés) 45
 - Ejemplos de Dosificación usando el Método Inglés 46
- METODO ACI 211.1-81 (REVISADA 1985) 48
 - Determinación de la razón Agua/Cemento 48
 - Determinación del tamaño máximo 51
 - Determinación de la fluidez 52
 - Determinación de la consistencia 52
 - Determinación de la dosis de agua 53
 - Determinación de la dosis de cemento 56
 - Determinación de la dosis de grava 57
 - Determinación de la dosis de arena 59
 - Cálculo de la Densidad Fresca del Hormigón 61
 - Comentarios y Limitaciones 62
 - Formulario de Dosificación (Método ACI) 63
 - Ejemplos de Dosificación usando el Método ACI 64



• METODO FAURY	66
➤ Diagrama de Flujo del Método Faury	67
➤ Determinación del tamaño máximo	69
➤ Determinación de la fluidez (dosis de agua).....	72
➤ Elección de la curva granulométrica ideal (determinación de la consistencia).....	74
➤ Determinación de la razón agua/cemento.....	76
➤ Determinación de la dosificación.....	76
➤ Determinación de la dosis de agua.....	76
➤ Determinación de la dosis de cemento.....	76
➤ Determinación de las dosis de áridos.....	78
➤ Comentarios al método de Faury.....	83
➤ Formulario de Dosificación Método Faury.....	85
➤ Ejemplos de Dosificación usando el Método Faury	87
• METODO DE VALETTE.....	89
➤ Determinación de las características físicas de los materiales componentes.....	90
➤ Determinación del mortero lleno, de mínimo contenido de cemento.....	90
➤ Determinación del hormigón lleno, de mínima dosis de cemento.....	91
➤ Determinación de la dosificación final.....	91
➤ Comentarios al Método de Valette.....	91
CORRECCIONES DE DOSIFICACION	92
• CORRECCIONES POR HUMEDAD	93
➤ Dosificación medida en peso	93
➤ Dosificación medida en volumen.....	96
• CORRECCION POR RENDIMIENTO	97
➤ Método de la densidad aparente real.....	98
➤ Método práctico.....	99
• CORRECCION POR VARIACIONES DE LA GRANULOMETRIA.....	101
• FORMULARIOS CORRECCION DOSIFICACION.....	102
VERIFICACION DOSIFICACION CON HORMIGONES DE PRUEBA	103
➤ Para Cambiar Asentamiento de Cono.....	105
➤ Ajuste de la Dosis de Cemento (razón W/C).....	106



CONSIDERACIONES BASICAS SOBRE DOSIFICACION

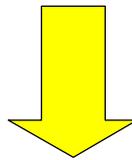
• OBJETIVO

Determinar proporciones de los materiales componentes de manera de obtener las condiciones esperadas del hormigón.

Estas condiciones son particulares de cada obra o parte de obra y pueden resumirse en la forma que se indica a continuación:

• CONDICIONES GENERALES PARA DOSIFICACION

Tipo de Condición	Características que deben considerarse	Parámetros Condicionantes
Diseño	Resistencia	Tipo de Cemento Razón W/C
Uso en Obra	Trabajabilidad: <u>Fluidez</u> Consistencia	Dosis de Agua Granulometría total
	Características del Elemento	Tamaño Máximo
Durabilidad	Condiciones Ambientales	Tipo de Cemento Uso Aditivos
	Ataques Agresivos	Dosis Mínima Cemento



Condiciones de partida para dosificación de un hormigón	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Tipo de Cemento ✓ Uso de Aditivos ✓ Tamaño Máximo ✓ Fluidez ✓ Consistencia ✓ Razón Agua/Cemento
--	--



• PARTICIPANTES

Para fabricar un buen hormigón se necesitan 5 individuos

un *sabio* para el *agua*

un *avaro* para el *cemento*

un *dadivoso* para los *áridos*

un *fantasioso* para los *aditivos*

y para revolverlo

un ***LOCO INGENIERO***



METODOS DE DOSIFICACION

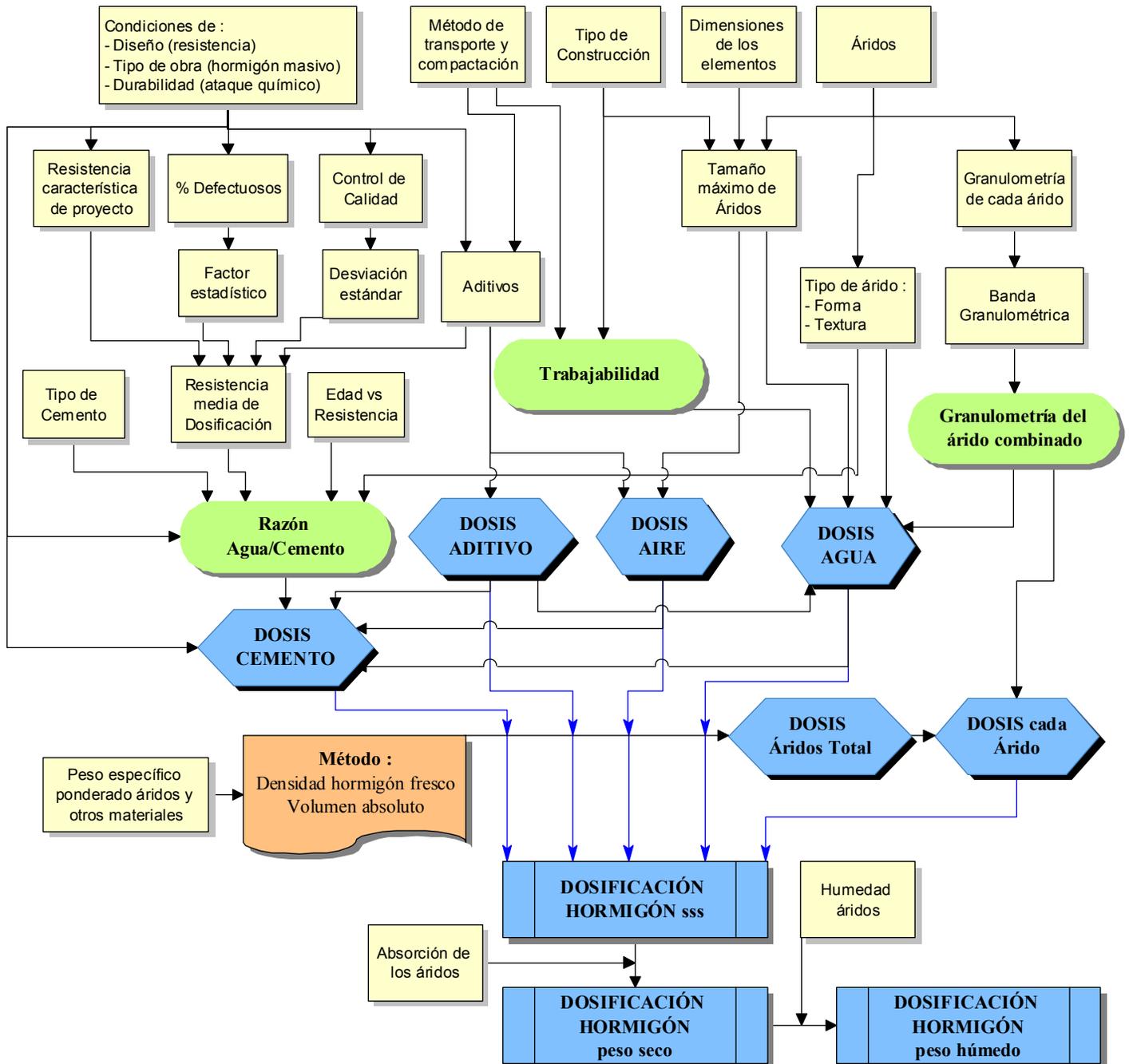
- **EMPIRICOS** → *INGLES ACI* → Basados en investigación experimental
- **RACIONALES** → *FAURY* → GRANULOMETRICO
- **PRACTICOS** → *VALETTE* → Se confecciona hormigón experimental en laboratorio



***HORMIGONES
DE
PRUEBA***



• DIAGRAMA DE DOSIFICACIÓN





• DOSIFICACION APROXIMADA

Dosificación aproximada para áridos de Santiago

Datos : $R_k \approx 18 \text{ MPa} = 180 \text{ kgf/cm}^2$
 Edificación: Cono $\approx 7 \text{ cm}$
 Densidad hormigón fresco $2.400 \text{ a } 2.500 \approx 2.420 \text{ kg/m}^3$
 Densidad real áridos $2.600 \text{ a } 2.700 \approx 2.700 \text{ kg/m}^3$
 Densidad aparente árido grueso $1.650 \text{ a } 1.750 \approx 1.700 \text{ kg/m}^3$
 Densidad aparente árido fino $1.300 \text{ a } 1.600 \approx 1.400 \text{ kg/m}^3$

Cálculo : Se supone
 Cemento (6 a 8 sacos) = 7 sacos x 42.5 = 300 kg
 Razón W/C = 0,6
 Agua = 0,6 * 300 = 180 lts.
 Peso áridos = 2.420 - 300 - 180 = 1.940 kg
 Suponiendo 35% arena = 680 kg
 65% grava = 1.260 kg

Material	Dosificación en peso (kg)	Densidad Aparente	Dosificación volumen [litros]	Esponj. arena	Dosificación Corregida [litros]	Densid. Real	Volumen absoluto [litros]
Cemento	300		300 kg		300 kg	3.0	100
Arena	680	1.4	485	30%	630	2.6	261
Grava	1.260	1.7	740		740	2.7	467
Agua	180		180		180	1	180
TOTAL	2.420						1.008

Verificación Resistencia para cementos especiales

$$C/W = R_{28} \times 0,0042 + 0,62$$

$$\Rightarrow R_{28} = \frac{1,7 - 0,62}{0,0042} = 257 \text{ kg/cm}^2 \Rightarrow R_k = 257 - 80 \approx 180 \text{ kgf/cm}^2$$

$$R_{28} < \text{contenido de cemento}$$



COSTO DIRECTO HORMIGON (\$/m³)

Material	Dosificación en peso [kg]	Dosificación volumen [m ³]	P.U. [\$/m ³] (Marzo 1998)	Precio [\$]
Cemento	300	7 sacos	2600 [\$/saco]	18200
Arena	680	0,631	5150	3250
Grava	1.260	0,741	4300	3186
Agua	180	0,180	117	21
SUB				
-TOTAL				24657
Confección				600
Transporte				60
Elevación				25
Colocación				300
Máquinas y Herramientas				
TOTAL				25.642

ESPECIFICACION OBRA

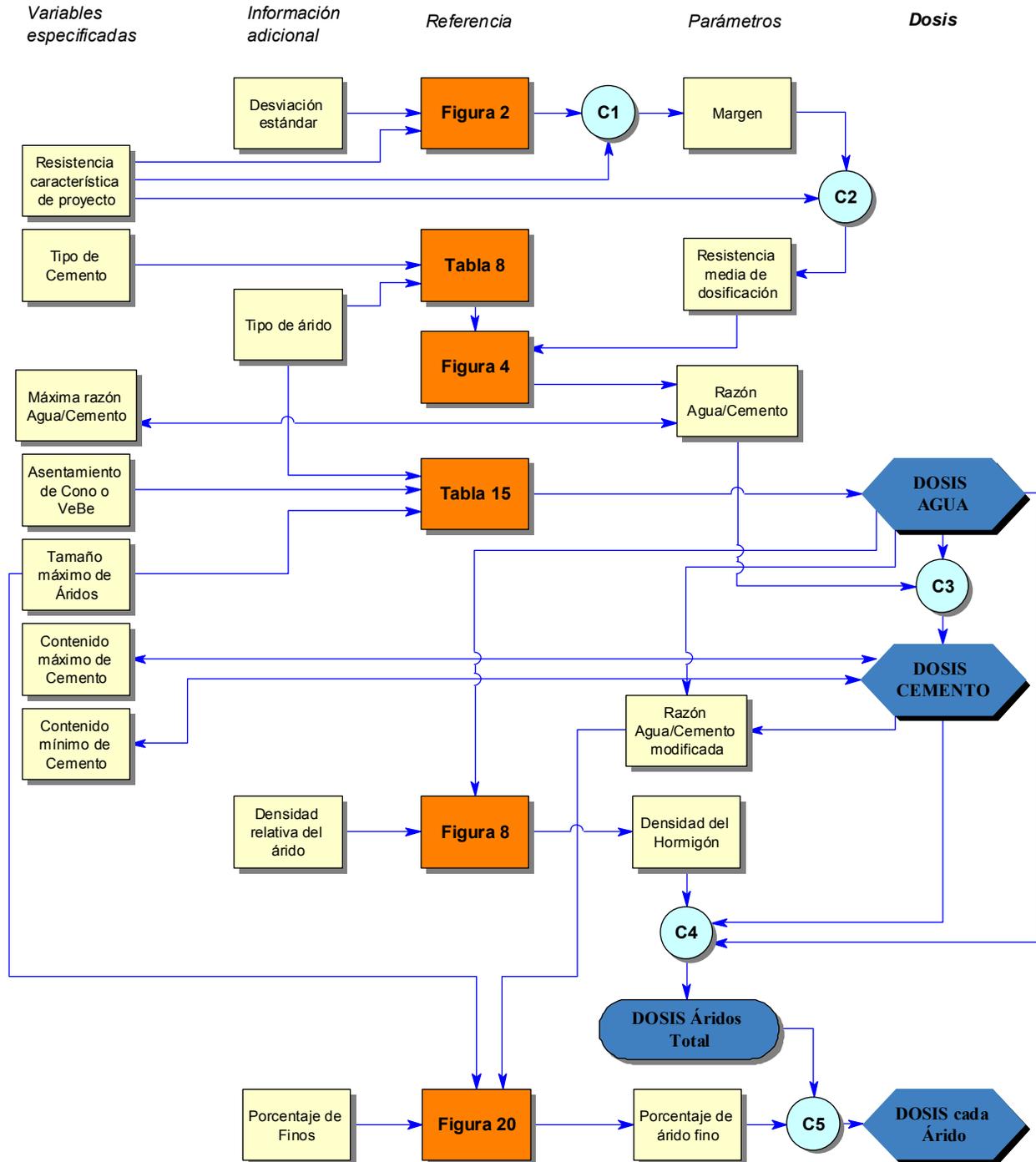
-----→ **COSTO**

CALIDAD EMPRESA



METODO INGLES (DICTUC y NCh170 Of.85)

➤ Diagrama de Flujo del Método de Dosificación





➤ Elección del Grado de Hormigón

Tabla 1 : Clasificación de los Hormigones por Resistencia a la Compresión Cúbica (NCh170 Of.85)

Grado	Resistencia Especificada, f_c	
	MPa	kgf/cm ²
H5	5	50
H10	10	100
H15	15	150
H20	20	200
H25	25	250
H30	30	300
H35	35	350
H40	40	400
H45	45	450
H50	50	500

Tabla 2 : Clasificación de los Hormigones por Resistencia a la Flexotracción (NCh170 Of.85)

Grado de Flexotracción	Resistencia Especificada, f_t	
	MPa	kgf/cm ²
HF 3	3,0	30
HF 3,5	3,5	35
HF 4	4,0	40
HF 4,5	4,5	45
HF 5	5,0	50
HF 5,5	5,5	55
HF 6	6,0	60



Tabla 3: Elección del Grado del Hormigón (NCh170 Of.85)

Grados de Hormigón	Solicitud y Exposición	Elementos Estructurales		
		En masa	Armados	Pretensados
H5	Elementos poco solicitados y sin peligro de heladas	Cimientos corridos, emplantillados, etc.	-	-
H10	Elementos poco solicitados y con peligro de heladas	Muros de contención, radieres.	-	-
H15 – H20	Elementos medianamente solicitados y con peligro de heladas	Elementos corrientes de la construcción, pavimentos, prefabricados		
H20 – H35	Elementos altamente solicitados con o sin peligro de heladas	-	Elementos especiales de la construcción, prefabricados en taller	
> H35				

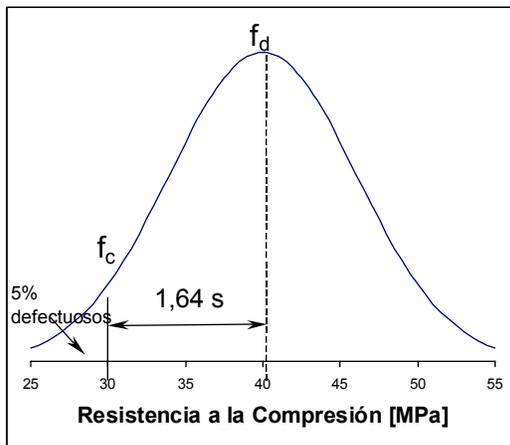


➤ Cálculo de la Resistencia Media de Dosificación

Para garantizar que el hormigón producido o un porcentaje de éste cumpla los requisitos de resistencia, se debe dosificar para una resistencia mayor a la especificada o característica (f_c).

Suponiendo que la resistencia del hormigón producido tiene una distribución normal :

$$f_d = f_c + t*s$$



f_c : Resistencia característica
 f_d : Resistencia media de dosificación
 s : desviación estándar de la obra.
 t : factor estadístico para un nivel de confianza (1,645 en la Fig. 1)

Fig. 1: Distribución Normal de las Resistencias del Hormigón

El **factor estadístico “t”** se determina de la Tabla 4 a partir del nivel de confianza o complemento del porcentaje de defectuosos (válido para más de 30 resultados).

Tabla 4 : Factor estadístico t (NCh170 Of.85)

Nivel de Confianza (1 - % defectuosos)	t	Normas
95 %	1,645	DIN - BSI - ACI NCh
90 %	1,282	
85 %	1,036	
80 %	0,842	NCh (pavimentos)



La **desviación estándar “s”** de la obra se determina con la estadística de resistencia del mismo tipo de hormigón con que cuente la empresa. En caso que no exista o la obra esté comenzando, se pueden utilizar los datos indicados en las Fig.2 o Tabla 5.

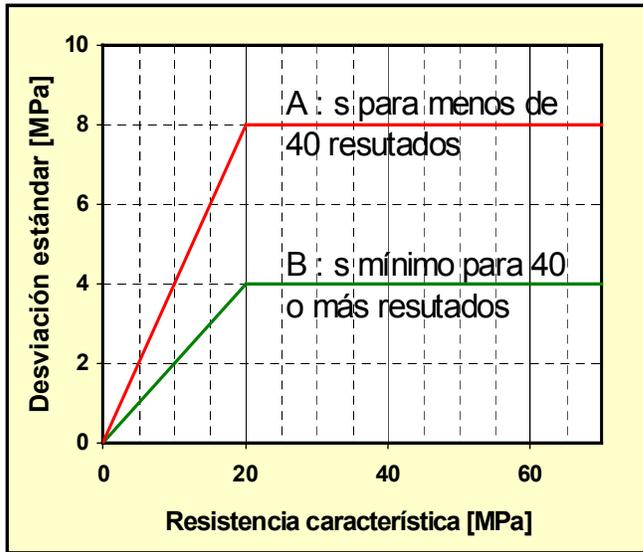


Fig. 2: Desviación estándar para resistencia a la compresión según BSI.

Nota: El método inglés BS 1975 establece que para resistencia a la tracción indirecta se debe usar 0,6 MPa como valor mínimo de desviación estándar cuando se tienen menos de 40 resultados previos y 0,3 MPa para 40 o más resultados. Estos valores se supone aplican para todos los grados de resistencia.

La Fig. 3 muestra el procedimiento recomendado por el Comité Europeo del Hormigón (CEB) para estimar la desviación estándar en función de la resistencia característica del hormigón y del número de resultados disponibles.

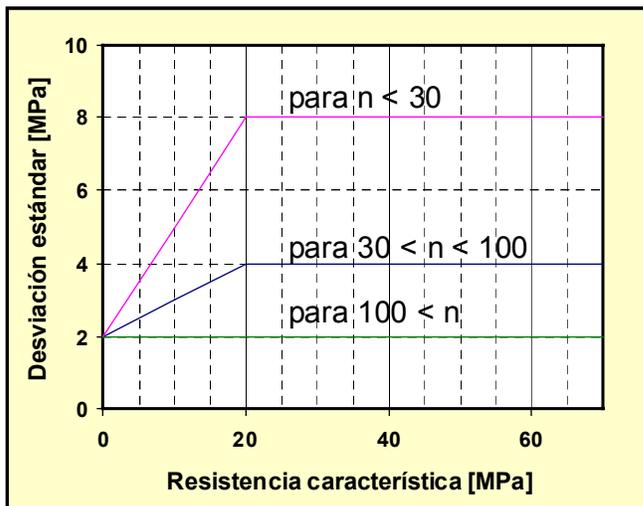


Fig. 3: Criterio del CEB para estimar la desviación estándar para resistencia a la compresión



Desviación estándar “s” según Norma chilena NCh170 Of.85:

- ⇒ Cuando no se disponga de resultados ni de antecedentes del contratista, para cualquier nivel de resistencia a la compresión especificada del proyecto, adoptar el valor : $s \geq 8 \text{ MPa}$.
- ⇒ Cuando se tienen antecedentes del mismo contratista, trabajando en condiciones similares se utiliza la Tabla 5.

Tabla 5 : Valor s estimado para resistencia a la compresión (NCh170 Of.85)

Condiciones previstas para la ejecución de la obra	s [MPa]		Definición de las condiciones
	≤ H15	> H15	
Regulares	8,0	-	Control deficiente, sólo grado ≤ H15
Medias	6,0	7,0	Dosificación de volumen controlado; control esporádico.
Buenas	4,0	5,0	Dosificación en peso o volumen controlado; control permanente.
Muy buenas	3,0	4,0	Dosificación en peso; laboratorio en faena; control permanente.

Con todos estos datos, la resistencia media de dosificación se calcula como :

$$f_d = f_c + t*s$$

$$\text{ó } f_d = f_c / (1 - CV) \text{ con } CV = s / f_d$$

- CV = 0,10 a 0,15 para Control Bueno
- = 0,15 a 0,20 para Control Normal
- = 0,20 a 0,25 para Control Deficiente

El término t·s se conoce como margen y se representa como M:

$$M = t*s$$

$$f_d = f_c + M$$



Efecto del aire incorporado en la resistencia (BSI 1975)

En general, la resistencia del hormigón se reduce con la adición de aire. La magnitud de la reducción varía según un número de factores.

Sin embargo, para el rango de aire que es comúnmente requerido en las mezclas (especificado normalmente 3 a 7%), se puede suponer una pérdida de resistencia de 5,5% en resistencia a la compresión y 4% en resistencia a la tracción indirecta por cada 1% en volumen de aire incorporado en la mezcla.

Con el objeto de estimar la razón W/C requerida para un hormigón con aire incorporado, se puede tomar en cuenta la pérdida de resistencia diseñando la mezcla para una resistencia media de dosificación apropiadamente mayor.

La resistencia media apropiada para una mezcla con aire incorporado está dada por la ecuación :

$$f_d = \frac{f_c + M}{1 - r \cdot a}$$

donde : f_c : resistencia característica especificada.
 M : margen (t·s)
 a : porcentaje en volumen de aire incorporado
 r : 0,055 cuando se diseña para resistencia a la compresión
0,040 cuando se diseña para resistencia a la tracción indirecta.

NOTA: Otra forma de considerar la pérdida de resistencia de hormigones con aire incorporado es considerando el aire como si fuera agua, es decir, la razón W/C se expresa como $(W + a)/C$



➤ *Determinación de la Razón Agua/Cemento*

⇒ Por Condición de Resistencia

Tabla 6 : Razón Agua/Cemento para Resistencia Media Requerida (NCh170 Of.85 y DICTUC)

Razón Agua/Cemento en masa	Resistencia Cúbica a Compresión Media Requerida a 28 días, f_d [MPa]			
	Cemento Grado Corriente		Cemento Grado Alta Resistencia	
	NCh170 *	DICTUC	NCh170 **	DICTUC
0,35		50		53
0,40		43,5		46
0,45	34	38	43	41
0,50	29	33,5	36	40
0,55	25	29	31	34
0,60	21	25	26	29,5
0,65	18	21	23	27
0,70	16	17,5	20	24
0,75	14	14,5	17	21
0,80	12		15	
0,85	10		13	

* $f_d = 22.8 (C/W - 0.73)$

** $f_d = 28.5 (C/W - 0.73)$

⇒ Por Condición de Durabilidad

Tabla 7 : Máxima razón W/C en casos de exposición severa (NCh170 Of.85)

Tipo de Estructura	Estructura continua o frecuentemente húmeda o expuesta a hielo-deshielo	Estructuras expuestas a aguas agresivas, en contacto con el suelo o ambiente salinos *
Secciones delgadas ($e \leq 20$ cm) y secciones con recubrimiento menor a 2 cm	0,45	0,40
Toda otra estructura	0,50	0,45

* Si se usa cemento resistente a los sulfatos ($C_3A < 5\%$), la relación W/C máxima se puede aumentar en 0,05.

ELEGIR LA MENOR RAZON W/C ENTRE LAS DOS CONDICIONES



Método Inglés para Resistencia a Compresión:

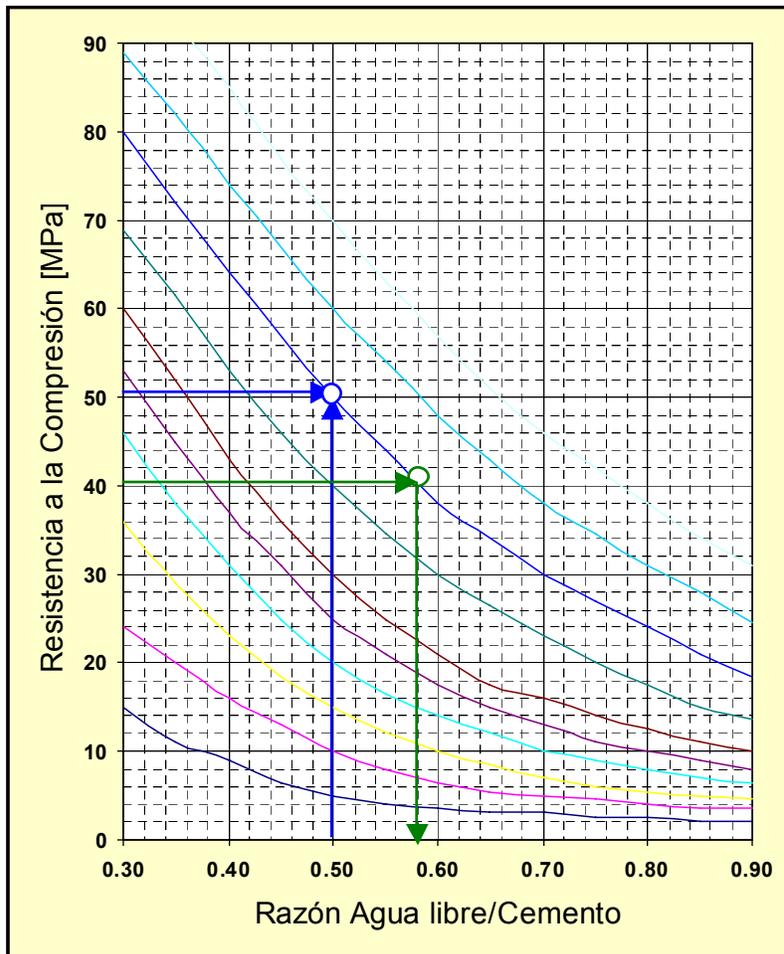


Fig. 4: Relación entre resistencia a compresión y razón Agua libre/Cemento para el Método Inglés de diseño de mezclas (1988).

Para utilizar este gráfico se necesita tener datos previos del mismo hormigón.

Con la razón W/C y R_{28} de un hormigón conocido se determina la curva que representa al tipo de hormigón (interpolada entre las curvas adyacentes) y entonces se puede determinar la razón W/C de la amasada requerida para cumplir la resistencia especificada.

Ejemplo:

Un hormigón de razón W/C = 0,50 tiene 50 [MPa] a los 28 días; luego, para un hormigón de 40 [MPa] se necesitará una razón W/C \approx 0,58

El Método Inglés proporciona la siguiente tabla para establecer el punto de partida para la dosificación de mezclas.

Tabla 8 : Resistencia a compresión cúbica aproximada (MPa) de mezclas de hormigón con razón W/C = 0,5 según el Método Inglés de 1988 *

Tipo de Cemento	Tipo de árido	Resistencia cúbica a la compresión [MPa]* a una edad de (días) :			
		3	7	28	91
Portland Corriente (Tipo I) y Portland resistente a sulfatos (Tipo V)	Rodado	22 (18)	30 (27)	42 (40)	49 (48)
	Chancado	27 (23)	36 (33)	49 (47)	56 (55)
Portland de rápido endurecimiento (Tipo III)	Rodado	29 (25)	37 (34)	48 (46)	54 (53)
	Chancado	34 (30)	43 (40)	55 (53)	61 (60)

* Valores entre paréntesis corresponden a los de la versión 1975



Método Inglés para Resistencia a Tracción Indirecta:

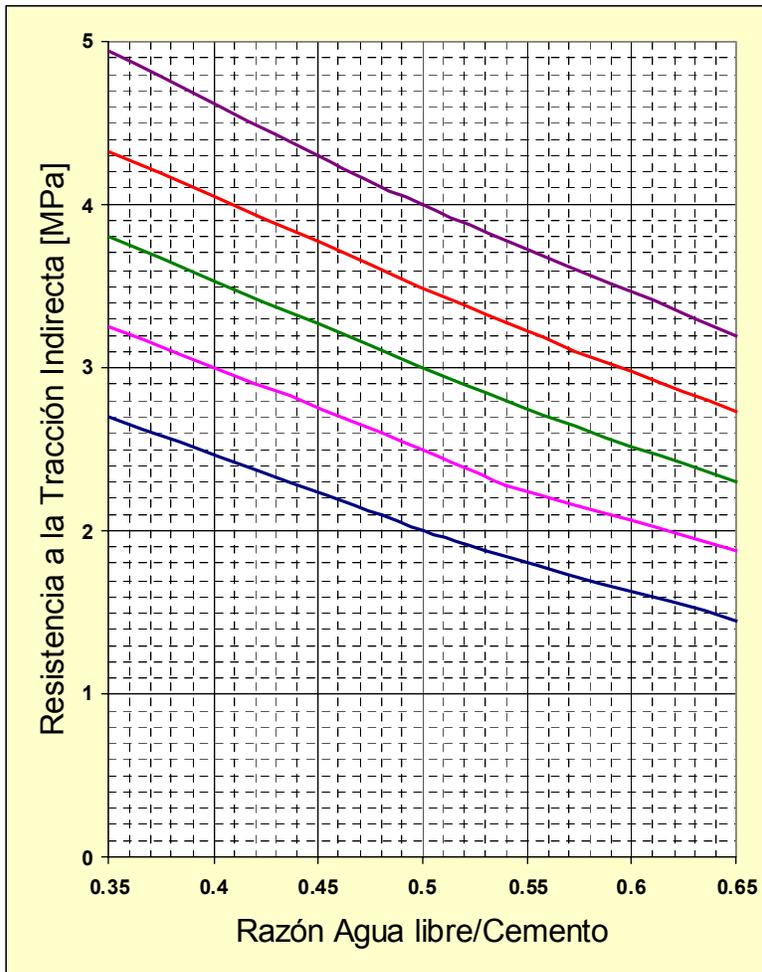


Fig. 5: Relación entre resistencia a la tracción indirecta y la razón Agua libre/Cemento para el Método Inglés de diseño de mezclas (1975).

Tabla 9 : Resistencia a tracción indirecta aproximada (MPa) de mezclas de hormigón con Cemento Portland Corriente y razón W/C = 0,5 según el Método Inglés de 1975

Tipo de árido	Resistencia a tracción indirecta [MPa] a una edad de (días) :			
	3	7	28	91
Rodado	1,7	2,2	2,8	3,3
Chancado	2,2	2,9	3,6	4,2



Tabla 10: Máxima razón W/C en casos de exposición severa (ACI).

Tipo de Estructura	Condiciones de exposición (x)					
	Climas extremos con frecuentes ciclos de congelación-deshielo SOLAMENTE HORMIGON CON AIRE INCORPORADO			Temperaturas moderadas, raramente por debajo de cero. Clima lluvioso o árido		
	Al aire	Al nivel del agua o en zonas fluctuación o salpicadura		Al aire	Al nivel del agua o en zonas fluctuación o salpicadura	
		En agua dulce	En agua mar o con sulfatos		En agua dulce	En agua mar o con sulfatos
Secciones delgadas como barandas, ornamentos, pilotes armados, tuberías y toda sección con menos de 2,5 cm. de recubrimiento	0,50	0,40	0,40 (1)	0,55	0,50	0,40 (1)
Secciones moderadas como muros de contención, estribos, pilares y vigas	0,55	0,50	0,45 (1)	(2)	0,55	0,45 (1)
Exterior de elementos en gran masa	0,60	0,50	0,45 (1)	(2)	0,55	0,45 (1)
Hormigón sumergido	--	0,45	0,45	(2)	0,45	0,45
Pavimentos	0,55			(2)		
Hormigón protegido de la intemperie, en interiores o enterrados	(2)	--	--	(2)	--	--
Hormigón que será protegido, pero estará expuesto por varios años al hielo-deshielo	0,55	--	--	(2)	--	--

(x) El aire incorporado se debe usar siempre frente a condiciones de exposición severa y puede usarse en climas moderados para mejorar la docilidad de la mezcla.

(1) Se usa cemento resistente a los sulfatos, la relación Agua/Cemento máxima se puede aumentar en 0,05 ($C_3A < 5\%$)

(2) Cantidad de agua determinada por condiciones resistencia y docilidad.



➤ Elección de la Trabajabilidad

Tabla 11: Asentamientos de Cono Recomendados según Tipo de Estructura y Técnica de Construcción

Tipo de estructura y técnica de construcción	Asentamiento en cm*	
	Mínimo	Máximo
Hormigón sin armar, ej. elementos de fundación *	2	7-8
Hormigón armado *:	4	10
• Muros armados de fundación y zapatas **	4	8
• Losas, vigas y muros armados **	5	10
• Columnas **	5	10
Pavimentos *	0-2	5
Construcción pesada en masa **	2	5
Elementos prefabricados	0	2
Transporte por grúa y capacho	4-5	6-8
Transporte por canoas (vaciado directo del mixer)	6-8	8-10
Hormigón bombeado	7-8	10-12
Hormigón bajo agua	15	--

(*) NCh 170 Of.85 Asentamientos de cono para compactación por vibración.

En situaciones excepcionales se podrá emplear apisonado manual, en cuyo caso, ambos límites de la tabla se deben aumentar en 4 cm.

En los casos que se evite la segregación y se asegure la obtención de un hormigón compacto, mediante el uso de aditivos o de tecnologías especiales de transporte y colocación, se podrán emplear docilidades distintas de las indicadas en la Tabla 11.

(**) Zabaleta: Se puede incrementar en 2 cm., cuando no se utilizan vibradores de alta frecuencia.

Tabla 12: Elección del Equipo de Compactación (NCh170 Of.85)

Docilidad	Asentamiento de cono [cm]	Altura máxima de caída [cm]	Equipos *
Seca	< 2	30	Mecánicos de alta potencia
Plástica	3 – 5	30	Mecánicos corrientes, especiales o sus combinaciones
Blanda	6 – 9	50	Manuales, mecánicos corrientes, especiales o sus combinaciones
Fluida	> 10	50	Manuales o especiales

* Equipos :

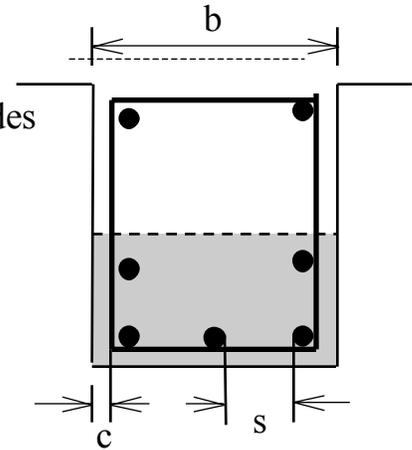
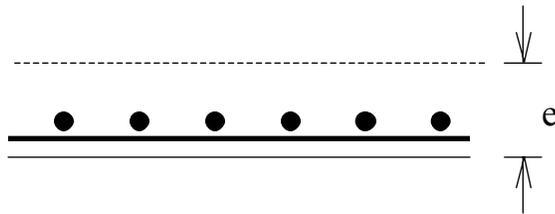
- Mecánicos de alta potencia : vibrador externo, pisón mecánico, vibro-compresión, etc.
- Corrientes : vibrador de inmersión, vibrador superficial, etc.
- Especiales : equipos de vacío, de centrifugado, etc.
- Manuales : varillas, martillo goma, macetas, paletas, etc.



➤ Elección del Tamaño Máximo Nominal del Árido

⇒ Norma NCh 170 Of.85 y ACI 211.1-85 (*):

$$D_n \leq \begin{cases} 1/5 b; & b = \text{menor dimensión interna entre paredes} \\ & \text{del molde} \\ 3/4 s; & s = \text{menor espacio libre entre armaduras} \\ 1/3 e; & e = \text{espesor de las losas armadas} \end{cases}$$



(*) Usar el mayor tamaño máximo económicamente disponible y consistente con las dimensiones de la estructura.

Cuando se desea hormigón de alta resistencia se pueden obtener mejores resultados con el uso de áridos de menor tamaño máximo nominal ya que estos producen mayores resistencias para una razón W/C dada.

- Elementos con hormigón a la vista:

$$D_n < 1,5c ; \quad c = \text{espesor de recubrimiento}$$

- Pavimentos:

$$D_n < 1/4 h ; \quad h = \text{altura del pavimento}$$

⇒ IDIEM propone además:

$$D_n \leq 1/3 b \quad \text{para elementos prefabricados.}$$

$$D_n = 6'' \quad \text{para hormigón masivo (represas)}$$



Tabla 13: Tamaño Máximo Recomendado (mm.) en función de la Dimensión Mínima de la Sección (NCh170 Of.85)

Dimensión Mínima de la Sección (cm)	Tamaño Máximo Recomendado en [mm.]			
	Muros armados, vigas y pilares	Muros sin armadura	Losas muy armadas	Losa débilmente armada o sin armadura.
6 - 12	10 - 20	20	20 - 25	20 - 40
12 - 30	20 - 40	40	25 - 40	40 - 75
30 - 70	40 - 75	75	40 - 75	- 75
> 70	40 - 75	150	40 - 75	75 - 150



➤ Dosis de Agua

Tabla 14: Volumen Estimado de Agua Libre de Amasado [litros] (NCh170 Of.85)

Tamaño máximo nominal [mm]	Docilidad según descenso de cono [cm]				
	0 - 2	3 - 5	6 - 9	10 - 15	16
63	135	145	155	165	170
50	145	155	165	175	180
40	150	160	170	180	185
25	170	180	190	200	205
20	175	185	195	205	210
12	185	200	210	220	230
10	190	205	215	230	240

- NOTAS:**
- La dosis de agua de amasado estimada tiene que ser ajustada en mezclas de prueba para cumplir con la docilidad requerida para la obra. Para esto, tiene que considerarse los aditivos plastificantes si están especificados, la proporción y la forma de los áridos.
 - La dosis de agua de amasado debe ser corregida por el agua absorbida por los áridos ya que en la tabla se consideran en condición sss.
 - Los aditivos solubles o líquidos se consideran como parte del agua libre o de amasado.

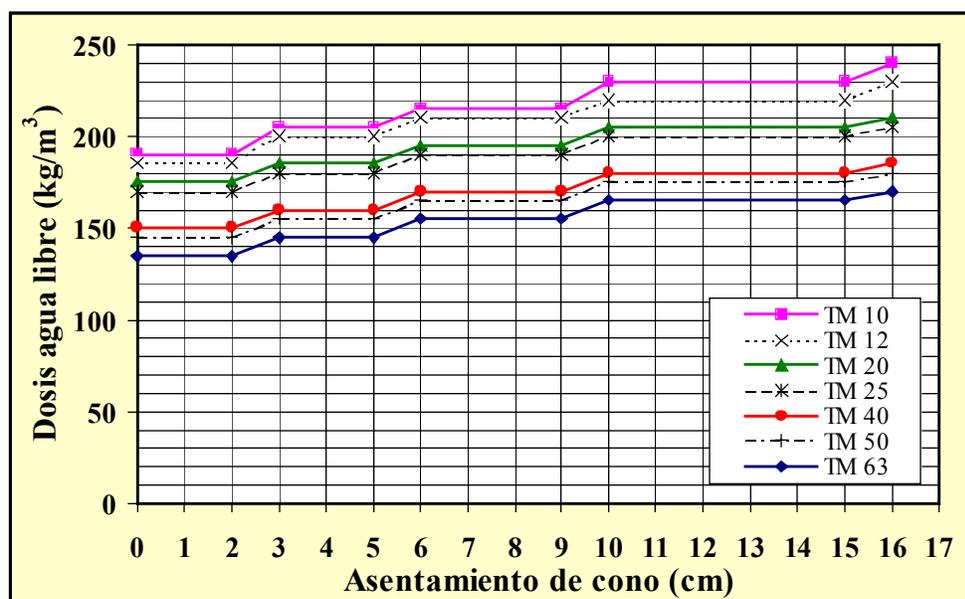


Fig. 6: Relación Cono - Agua Libre (NCh170 Of.85)



Tabla 15: Dosis de agua libre aproximada requerida para varios niveles de trabajabilidad (Método Inglés 1988 modificado por DICTUC)

Arido		Dosis de agua libre (kg/m ³) para:				
Tamaño máximo [mm]	Tipo de árido	Asentamiento de cono [cm]	0 - 1	1 - 3	3 - 6	6 - 18
		Vebe [s]	> 12	6 - 12	3 - 6	0 - 3
10	Rondado		150	180	205	225
	Chancado		180	205	230	250
20	Rondado		135 (135)	160 (160)	180 (180)	195 (195)
	Chancado		160 (170)	170 (190)	190 (210)	215 (225)
40	Rondado		115 (115)	140 (140)	160 (160)	175 (175)
	Chancado		140 (155)	160 (175)	180 (190)	195 (205)

NOTAS: 1.- En itálicas valores originales propuestos por Método Inglés.

2.- Cuando el árido grueso y la arena son de diferente tipo, la dosis de agua libre se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$W = \frac{2}{3} W_a + \frac{1}{3} W_g$$

donde W_a = dosis de agua para tipo de árido de la arena
 W_g = dosis de agua para tipo de árido del árido grueso

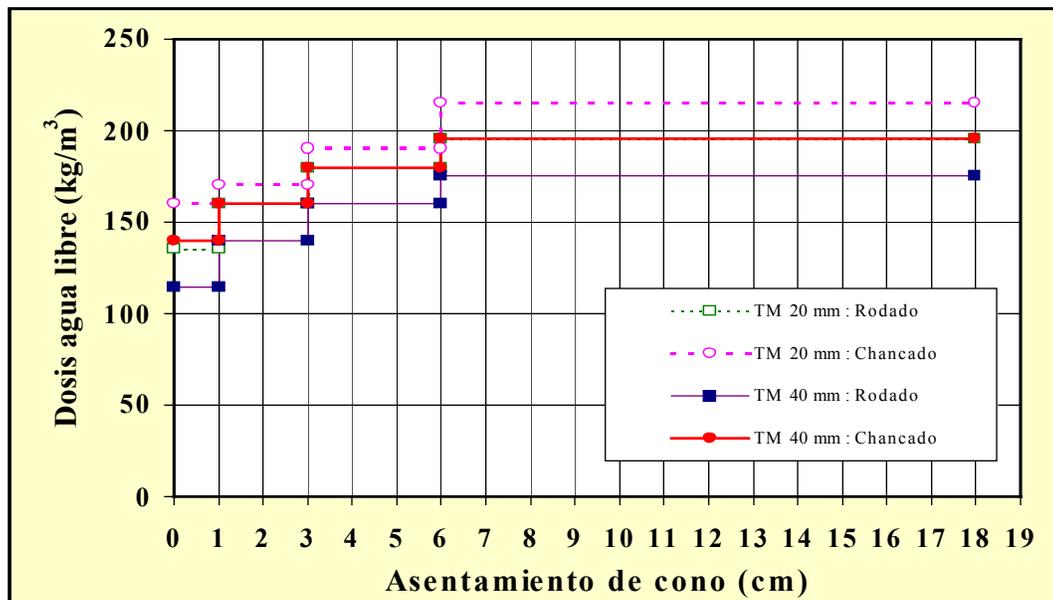


Fig. 7: Relación Cono - Agua Libre (Método Inglés 1988 modificado por DICTUC)



⇒ **Efecto del aire incorporado en la Trabajabilidad (BSI 1988)**

El efecto en la mayoría de los casos es producir una mezcla con una trabajabilidad en la siguiente categoría más trabajable de las indicadas en Tabla 5, para una dosis de agua dada.

⇒ **Efecto de las Cenizas Volantes en la Trabajabilidad (BSI 1988)**

Tabla 16: Reducción de la dosis de agua libre de la Tabla 15 cuando se usa ceniza volante (PFA = Pulverized Fuel Ash o Fly Ash)

Porcentaje de Ceniza volante en el material cementicio	Reducción de la dosis de agua (kg/m ³) para:				
	Asentamiento de cono [cm]	0 - 1	1 - 3	3 - 6	6 - 10
	Vebe [s]	> 12	6 - 12	3 - 6	0 - 3
10		5	5	5	10
20		10	10	10	15
30		15	15	20	20
40		20	20	25	25
50		25	25	30	30



➤ *Dosis de Cemento*

Determinada la razón W/C y la dosis de agua, la cantidad de cemento está dada por la fórmula:

$$C = \frac{W}{W/C} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Tabla 17: Dosis mínimas de cemento (NCh 170 Of.85)

Dosis Mínima de Cemento [kg/m³]	
Hormigón armado protegido de la intemperie	240
Hormigón armado expuesto a la intemperie	270
Hormigón armado no controlado (grado < H20)	300
Hormigón simple no controlado	170



➤ Dosis de Aire

⇒ Hormigones corrientes

Tabla 18: Aire promedio atrapado (NCh170 Of.85)

Tamaño máximo nominal [mm]	Volumen medio de aire atrapado [m³]
63	0,003
50	0,005
40	0,010
25	0,015
20	0,020
12	0,025
10	0,030

⇒ Hormigones con aditivos incorporadores de aire

Tabla 19: Contenido de aire (NCh170 Of.85)

Tamaño máximo nominal del árido [mm]	Contenido de aire [%]
10	6
13	5,5
19	5
25	4,5
38	4,5
50 (*)	4

NOTAS :

- Tolerancia = $\pm 1,5$
- Para hormigones grado superior a H35 contenido de aire de tabla se pueden reducir en 1%.

(*) Al comprobar el contenido de aire en este caso, se debe remover todo el árido con tamaño mayor que 38 mm y la determinación se hará en la fracción de tamaño inferior a 38 mm y se aplica una tolerancia de $\pm 1,0$.



➤ Densidad del Hormigón Fresco Compactado

Se calcula a partir del tipo de árido a usar.

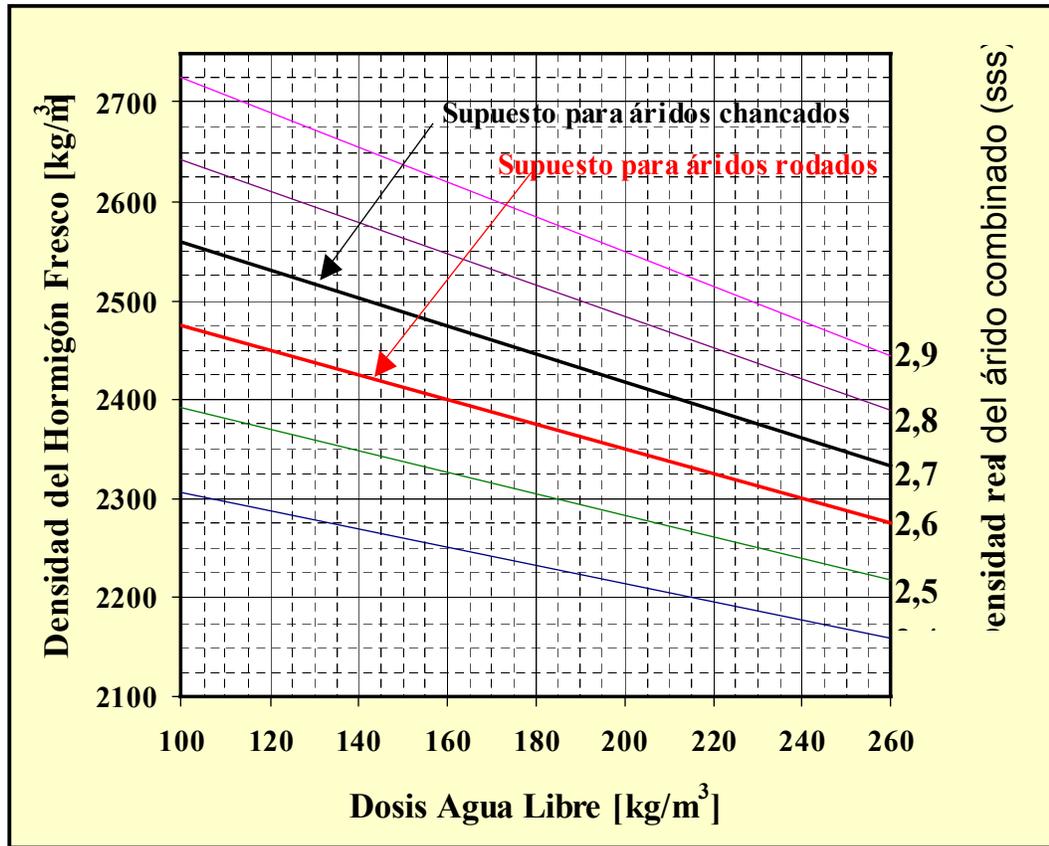


Fig. 8: Densidad estimada del hormigón fresco totalmente compactado, a partir de la dosis de agua y la densidad real de los áridos (BS 1988)

⇒ Densidad de mezclas con aire incorporado

La estimación de la densidad de mezclas con aire incorporado se puede hacer usando la Fig. 8. El valor correcto se obtiene restando de la densidad fresca de la Fig. 8, el valor :

$$10 \cdot a \cdot \gamma_a$$

donde: a = porcentaje en volumen de aire incorporado requerido

γ_a = densidad real del árido calculado en condición sss. Cuando no se conoce se puede hacer una aproximación suponiendo un valor 2,6 ó 2,7 para áridos rodados o chancados, respectivamente.





➤ *Dosis de Áridos*

La dosis del árido total se calcula restando de la densidad del hormigón las dosis del cemento y del agua:

$$\text{Dosis total de árido : } A = D - C - W$$

con D = densidad hormigón fresco compactado [kg/m^3]
 C = dosis cemento [kg/m^3]
 W = dosis agua libre [kg/m^3]

La proporción adecuada de los áridos gruesos y finos debe ajustarse a:

- Que proporcione un hormigón de:
 - Máxima compacidad
 - Docilidad adecuada para condiciones de obra
- Considerar características de los áridos disponibles
 - Granulometría
 - Densidad
 - Textura
 - Forma
- Proporciones de los áridos determinadas considerando
 - Granulometría de cada uno de los áridos
 - Granulometría del árido combinado



➤ **Bandas granulométricas recomendadas.**

⇒ **Norma NCh 163 Of.79**

Tabla 20 : Bandas granulométricas (NCh163 Of.79)

Tamiz mm	Tamaño máximo 10mm				Tamaño máximo 20mm			
	D	A	B	C	D	A	B	C
40	100	100	100	100	100	100	100	100
20	100	100	100	100	100	100	100	100
10	100	100	100	100	30	62	77	88
5	30	61	74	87	30	37	58	75
2,5	30	37	56	73	30	22	43	63
1,25	30	22	41	59		13	33	52
0,63		13	27	43		8	23	38
0,32		5	13	26		4	12	23
0,16		3	7	10		3	6	9

Tamiz Mm	Tamaño máximo 40mm				Tamaño máximo 80mm			
	D	A	B	C	D	A	B	C
80	100	100	100	100	100	100	100	100
40	100	100	100	100	30	70	80	90
20	30	60	80	90	30	45	65	80
10	30	40	61	80	30	30	50	70
5	30	24	48	66	30	20	40	60
2,5		15	37	55		12	30	50
1,25		10	28	42		7	25	40
0,63		6	19	30		4	17	28
0,32		3	11	19		3	9	17
0,16		2	5	8		2	4	7

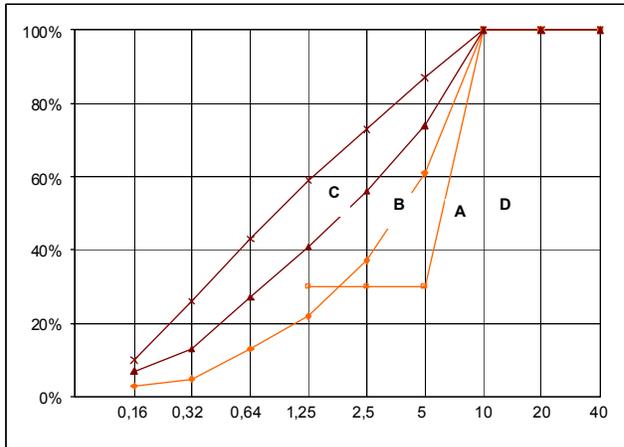


Fig. 9: Curvas granulométricas recomendadas para un árido tamaño máximo de 10 mm (NCh163 Of.75)

Fig. 10: Curvas granulométricas recomendadas para un árido tamaño máximo de 20 mm (NCh163 Of.75)

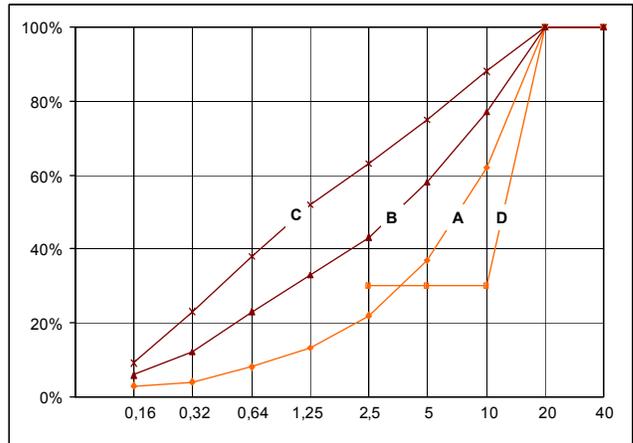


Fig. 11: Curvas granulométricas recomendadas para un árido tamaño máximo de 40 mm (NCh163 Of.75)

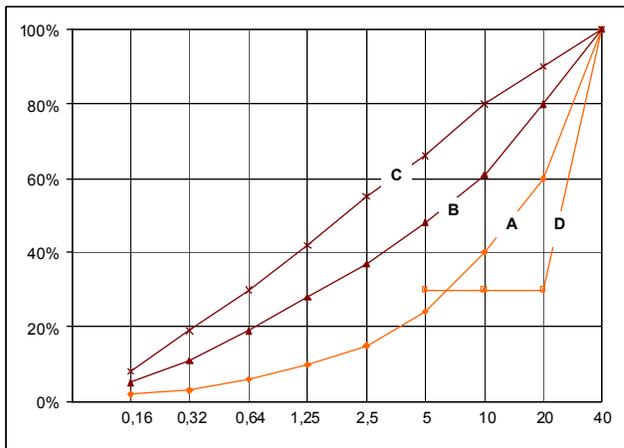
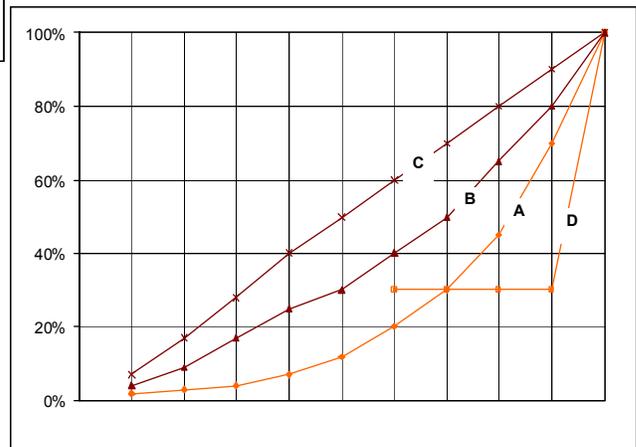


Fig. 12: Curvas granulométricas recomendadas para un árido tamaño máximo de 80 mm (NCh163 Of.75)





⇒ Norma Inglesa Road Research Note N°4

Tabla 21 : Curvas granulométricas recomendadas (Road Note N°4)

Tamiz mm	Tamaño máx. 40 mm				Tamaño máx. 20 mm				Tamaño máx. 10 mm			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
40	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
20	50	59	67	75	100	100	100	100	100	100	100	100
10	36	44	52	60	45	55	65	75	100	100	100	100
5	24	32	40	47	30	35	42	48	30	45	60	75
2,5	18	25	31	38	23	28	35	42	20	33	46	60
1,25	12	17	24	30	16	21	28	34	16	26	37	46
0,63	7	12	17	23	9	14	21	27	12	19	28	34
0,32	3	7	11	15	2	3	5	12	4	8	14	20
0,16	0	0	2	5	0	0	0	1,5	0	1	3	6

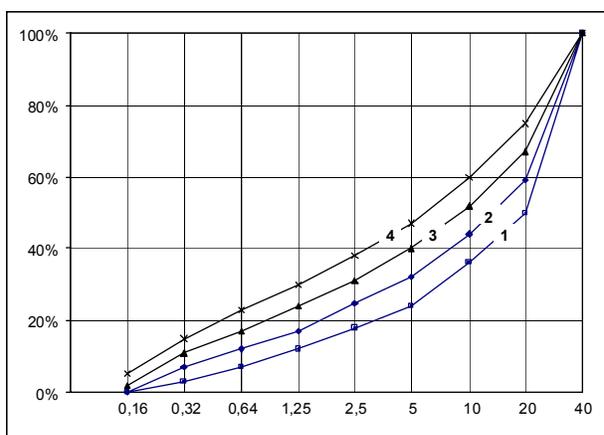


Fig. 14: Curva granulométrica recomendada para áridos tamaño máximo de 20 mm (Road Note N°4)

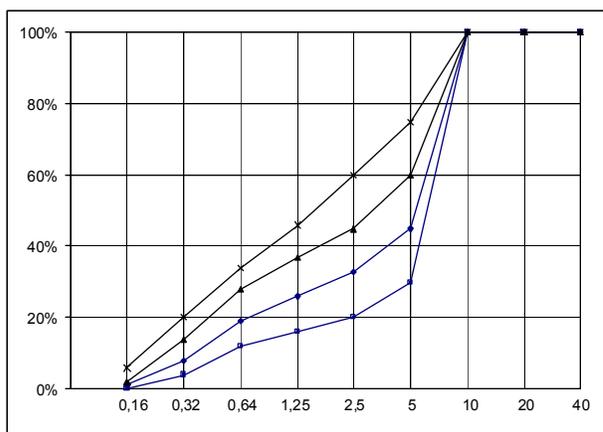


Fig. 13: Curva granulométrica recomendada para áridos tamaño máximo de 40 mm (Road Note N°4)

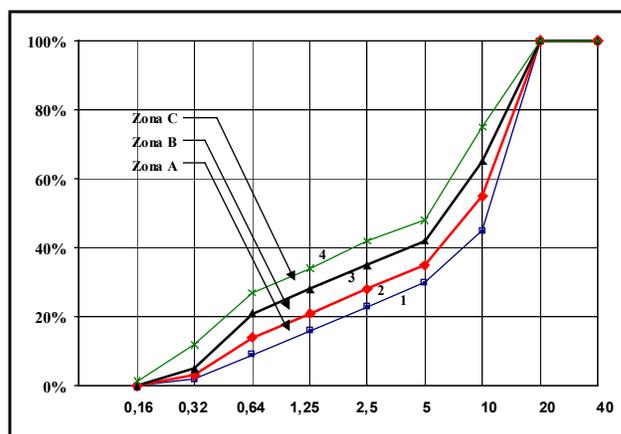


Fig. 15: Curva granulométrica recomendada para áridos tamaño máximo de 10 mm



(Road Note N°4)

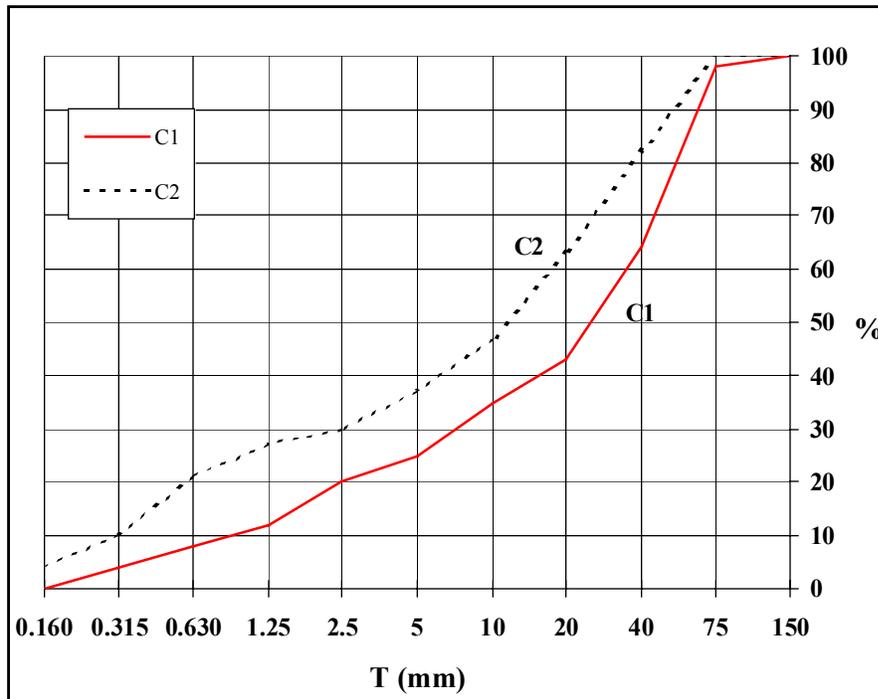


Fig. 16: Curva granulométrica recomendada para áridos tamaño máximo de 76,2 mm (McIntosh)

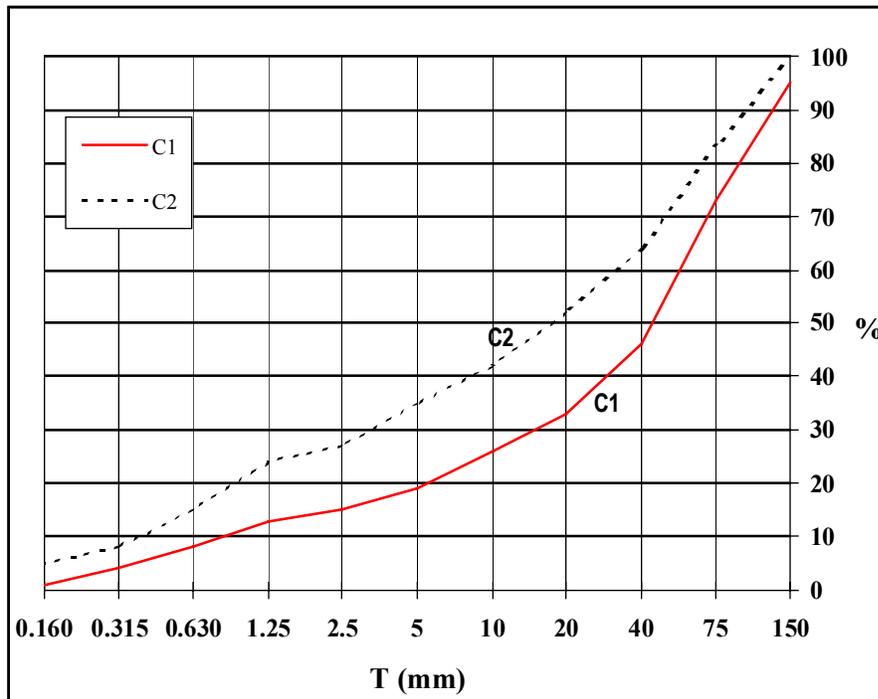


Fig. 17: Curva granulométrica recomendada para áridos tamaño máximo de 152,4 mm (McIntosh)



⇒ Significado de las bandas granulométricas

✓ Curvas y Bandas Norma NCh 163 Of.79

- Zona 1:** Curvas límites C y D
Zona aceptable para granulometrías discontinuas.
- Zona 2:** Curvas límites A y B
Zona preferida.
- Zona 3:** Curvas límites B y C
Aceptable, pero requiere más cemento y agua.
- Curva A:** Granulometría más gruesa.
Relativamente trabajable.
Usar en mezclas con baja razón W/C o mezclas ricas.
Verificar que no exista segregación.
- Curva C:** Granulometría más fina.
Cohesiva.
No muy trabajable.
- Curva D:** Granulometría discontinua.
Peligro segregación.
Si hay exceso de tamaños intermedios será áspera y difícil de compactar.



✓ Curvas Road Note N°4

Zona A: Curvas límites 1 y 2
Zona aceptable para granulometrías discontinuas.
Hormigones de pavimentos

Zona B: Curvas límites 2 y 3
Zona preferida.
Hormigones corrientes

Zona C: Curvas límites 3 y 4
Aceptable, pero requiere más cemento y agua.
Hormigones bombeados

Curva 1: Granulometría más gruesa.
Relativamente trabajable.
Usar en mezclas con baja razón W/C o mezclas ricas.
Verificar que no exista segregación.

Curva 4: Granulometría más fina.
Cohesiva pero no muy trabajable.
Un exceso de partículas entre 1,25 y 5 mm producirá hormigón aspero.
Requiere una mayor dosis de agua para una trabajabilidad dada.

La curva del árido combinado debe tener en lo posible una forma similar (paralela) a las curvas límites y no debe cruzar de una zona a otra (peligro segregación o dificultad compactación).



➤ *Métodos para el proporcionamiento de los áridos*

La Norma Chilena no establece procedimientos para encontrar la proporción de los áridos que permita satisfacer la banda recomendada, por lo que se puede seguir cualquier procedimiento, como por ejemplo :

- Por tanteo
- Proporción geométrica
- Planteando un sistema de ecuaciones
- Por mínimos cuadrados



⇒ Por tanteo

Consiste básicamente en determinar las cantidades de cada uno de los áridos a utilizar por medio de tanteos y verificar la bondad del ajuste en un gráfico. Una planilla Excel, permite realizar rápidamente muchas iteraciones.

Tabla 22: Ejemplo ajuste de 3 áridos (G, g, a) mediante tanteos.

PROP. PESO SUPUESTA	Grava	Gravilla	Arena 1	Arena 2	Mezcla OK	Tanteo 1	Tanteo 2
	37.0	30.0	33.0				
Tamiz (mm)	% pasa en peso						
80	100	100	100		100	100	100
40	100	100	100		100	100	100
20	15	80	100		63	75	59
10	0	45	100		47	58	41
5		15	95		36	44	29
2.5		0	85		28	34	21
1.25			62		20	25	16
0.63			43		14	17	11
0.315			25		8	10	6
0.16			4		1	2	1
TANTEO 1	20.0	40.0	40.0			OK	
TANTEO 2	40.0	35.0	25.0				OK

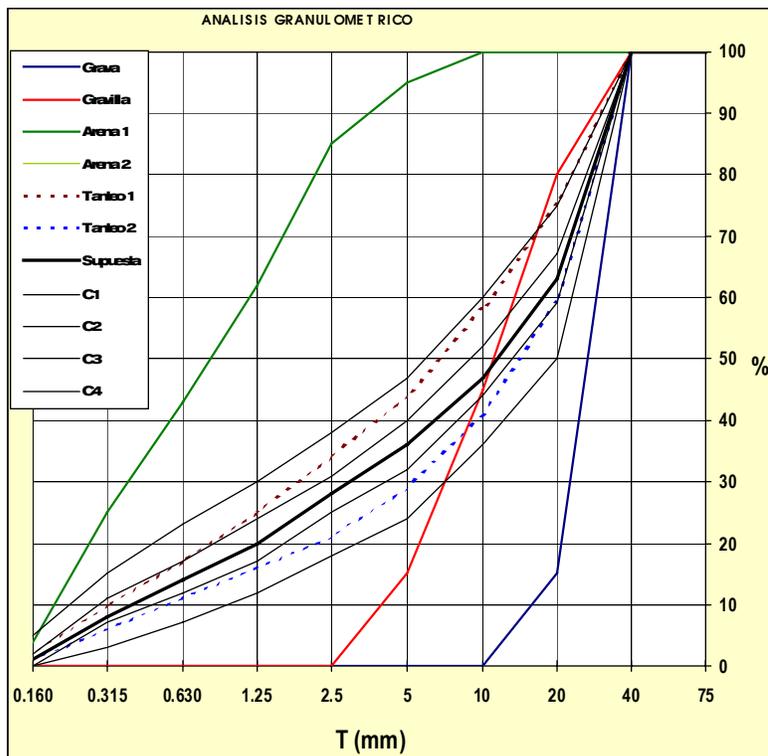


Fig. 18: Ejemplo proporcionamiento de áridos por tanteo



⇒ Por mínimos cuadrados

El método con mejores resultados es el método por mínimos cuadrados:

Tabla 23: Ejemplo ajuste de 3 áridos (A, B, C) mediante mínimos cuadrados.

Tamiz	A	B	C	Objetivo	f(A,B,C)	EC
40	100%	100%	100%	100%	100%	-
20	100%	95%	12%	59%	60%	0.017
10	100%	45%	0%	44%	43%	0.009
5	91%	10%		32%	31%	0.005
2.5	73%	0%		25%	23%	0.002
1.25	61%			16%	19%	0.007
0.63	44%			13%	14%	0.002
0.32	20%			6%	6%	0.000
0.16	5%			0%	2%	0.000
	α_0	β_0	γ_0			
%	40%	30%	30%	Suma EC		0.043

Este método consiste en minimizar el cuadrado de las diferencias entre una curva objetivo y otra obtenida con parámetros iniciales: α_0 , β_0 y $\gamma_0 = 1 - \alpha_0 - \beta_0$; por ejemplo, con $\alpha_0 = 40\%$, $\beta_0 = 30\%$ y $\gamma_0 = 1 - 40\% - 30\% = 30\%$. Con estos valores la suma de los E.C. es 0,043.

En un programa como Excel, la celda de la suma de los E.C. se le entrega al Solver como objetivo a minimizar y las celdas de las proporciones iniciales $\alpha_0 = 40\%$, $\beta_0 = 30\%$ y $\gamma_0 = 30\%$. El solver entregará en estas últimas los porcentajes que minimizan la celda objetivo.

Tabla 24: Ejemplo resultados ajuste de 3 áridos (A, B, C) usando Excel.

Tamiz	A	B	C	Objetivo	f(A,B,C)	EC
40	100%	100%	100%	100%	100%	-
20	100%	95%	12%	59%	60%	0.000
10	100%	45%	0%	44%	43%	0.000
5	91%	10%		32%	31%	0.000
2.5	73%	0%		25%	23%	0.000
1.25	61%			16%	19%	0.001
0.63	44%			13%	14%	0.000
0.32	20%			6%	6%	0.000
0.16	5%			0%	2%	0.000
	α_0	β_0	γ_0			



%	32%	24%	44%	Suma EC	0.002
----------	-----	-----	-----	----------------	-------

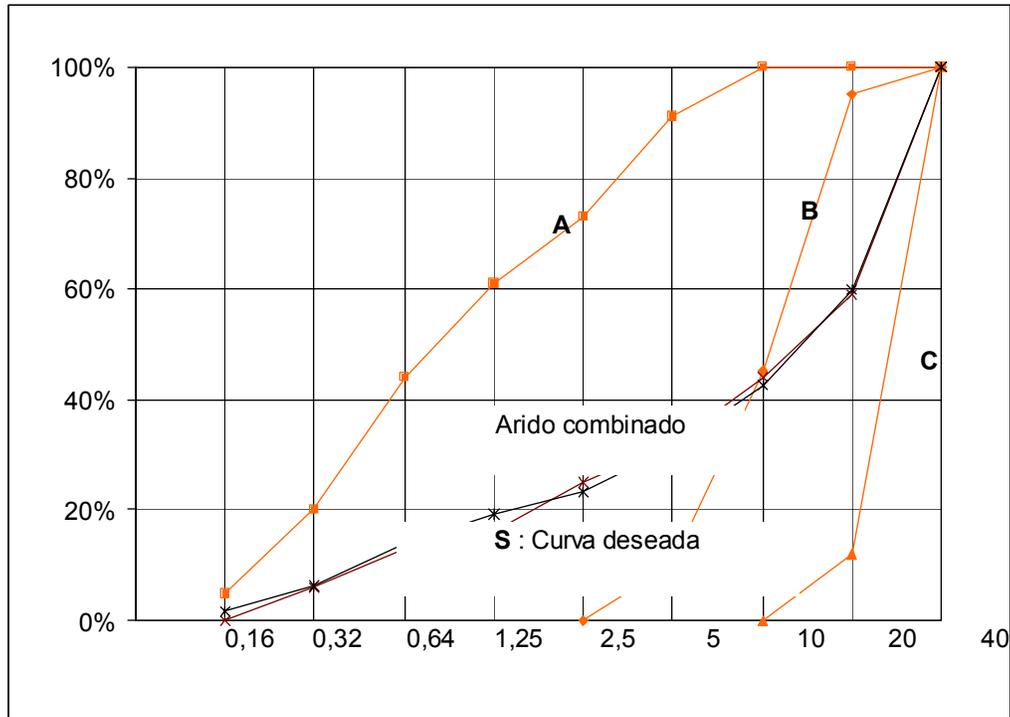


Fig. 19: Ejemplo ajuste de 3 áridos (A,B,C) mediante mínimos cuadrados.

⇒ Método Inglés

El método inglés utiliza la Fig. 20 para determinar las proporciones entre dos áridos utilizando el porcentaje de finos que pasa la malla 0,60mm., el asentamiento de cono o tiempo Vebe especificado y la razón W/C.

Además el Método Inglés de 1975 sugiere las siguientes combinaciones para el árido grueso:

1 : 2 para combinación áridos tamaño máximo 10 y 20 mm.

1 : 1,5 : 3 para combinación áridos tamaño máximo 10, 20 y 40 mm.

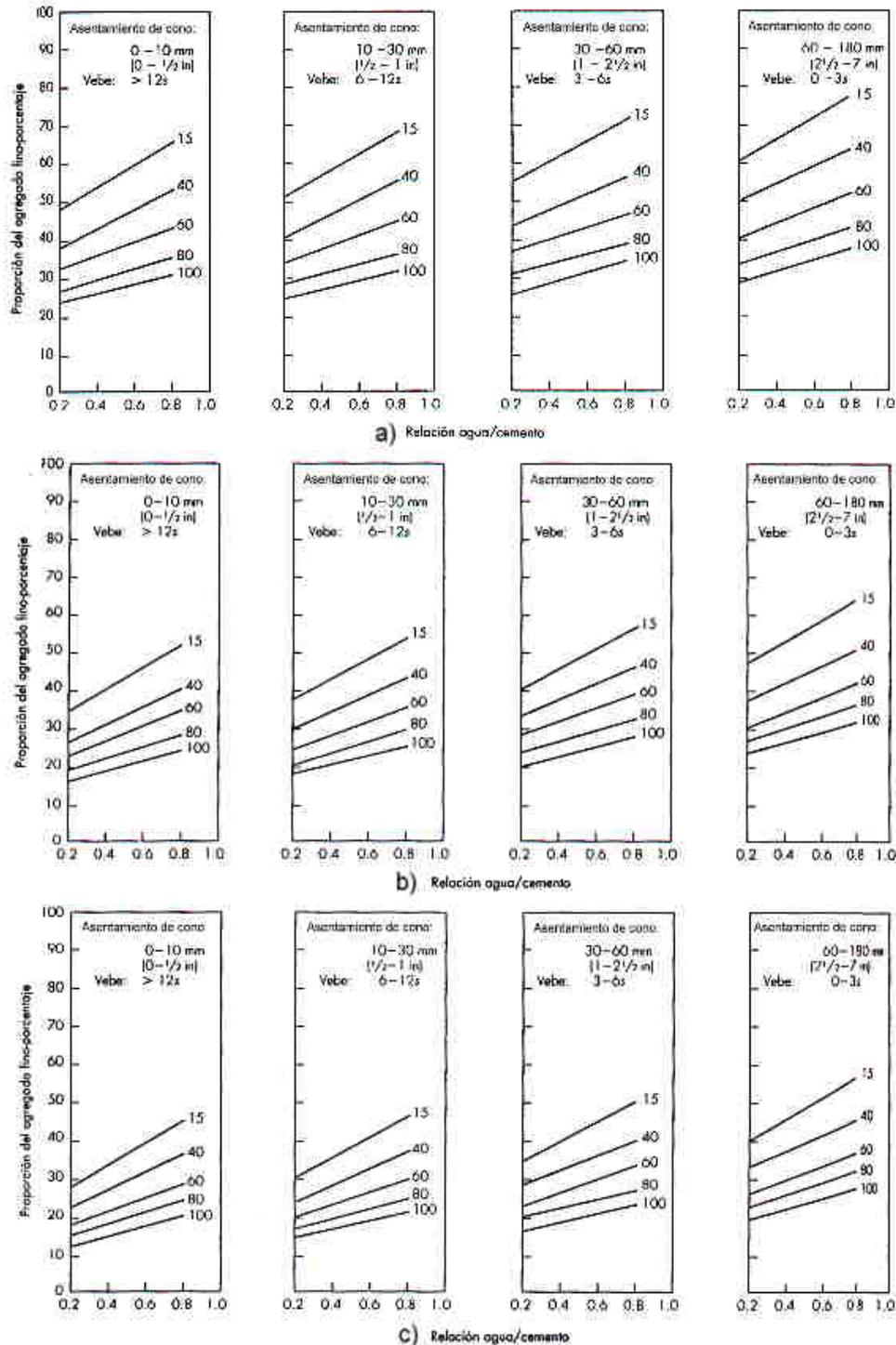


Fig. 20: Porcentaje recomendado de arena en el árido total como una función de la relación Agua libre /Cemento para varios valores de trabajabilidad y tamaño máximo del árido: a) 10mm, b) 20 mm, c) 40 mm. Los números en cada gráfica indican el porcentaje de finos que pasan por la malla de 0,6 mm. (BS 1988)



➤ Ejemplos de Dosificación usando el Método Inglés

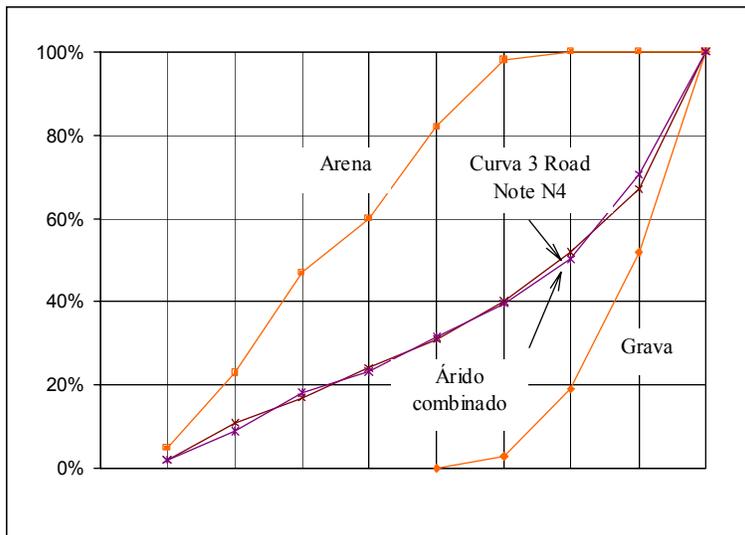
Ejemplo A

Propiedad Aridos	Arena	Grava
Tipo	Rodada	Chanc.
Densidad Aparente [kg/dm ³]	1,80	1,65
Peso específico	2,70	2,70

Tamiz [mm]	Arena	Grava
40	100%	100%
20	100%	52%
10	100%	19%
5	98%	3%
2.5	82%	0%
1.25	60%	
0.63	47%	
0.32	23%	
0.16	5%	

- ✓ Dosificar utilizando el Método Inglés un hormigón de 30 MPa a 28 días con 5% de defectuosos para una losa de 15 cm de espesor y enfierradura $\phi 10@20$. Esta losa estará protegida de la intemperie, de ciclos hielo-deshielo y de sales.
- ✓ Se conoce la desviación estándar de la obra : $s = 4$ MPa.
- ✓ Se usará hormigón convencional compactado con vibrador de inmersión y transportado con grúa y capacho.
- ✓ Utilizar los áridos dados. Ajustar a la curva 3 del Road Note N°4.
- ✓ Utilizar Cemento Portland Puzolánico corriente.
- ✓ La densidad real del cemento es 3 kg/dm^3 .

Aplicando el método de los mínimos cuadrados (después de verificar que sirve el Tamaño Máximo = 40 mm)



$$\alpha_{\text{Arena}} = 31\%$$

$$\alpha_{\text{Grava}} = 69\%$$

Fig. Ejemplo A.



• METODO ACI 211.1-81 (revisada 1985)

El método del American Concrete Institute se basa en tablas empíricas mediante las cuales se determinan las condiciones de partida y la dosificación.

➤ *Determinación de la razón Agua/Cemento*

Las Tablas 25 y 26 definen la razón agua/cemento en función de la resistencia media y especificada para el hormigón, respectivamente, en probetas cilíndricas. Como estos valores no son aplicables a los cementos chilenos, se recomienda usar los indicados en Tabla 6.

La Tabla 27 (alternativamente Tabla 10), determina la razón agua/cemento máxima en función de las condiciones ambientales a que estará expuesto el hormigón durante su vida útil (en condiciones de exposición severa).

⇒ Por Condición de Resistencia

Tabla 25: Relación entre la razón Agua libre/Cemento y la resistencia promedio a compresión del hormigón (ACI 211.1- Rev. 85)

Resistencia promedio a compresión a 28 días *		Razón Agua libre/Cemento (en masa)	
MPa	psi	Sin aire incorporado	Con aire incorporado
45	-	0,38	-
42	6000	0,41	-
40	-	0,43	-
35	5000	0,48	0,40
30	-	0,55	0,46
28	4000	0,57	0,48
25	-	0,62	0,53
21	3000	0,68	0,59
20	-	0,70	0,61
15	-	0,80	0,71
14	2000	0,82	0,74

(*) Medida en cilindros estándar. Valores son para un tamaño máximo del árido de 20 a 25 mm., para hormigón conteniendo no más del porcentaje de aire especificado (2 ó 6%) y para cemento Portland corriente (Tipo I).



Tabla 26: Relación entre la razón Agua/Cemento y la resistencia a compresión específica a 28 días (ACI 318-83)

Resistencia específica a compresión a 28 días *		Razón Agua absoluta /Cemento (en masa)	
MPa	psi	Sin aire incorporado	Con aire incorporado
32	4500	0,38	-
30	-	0,40	-
28	4000	0,44	0,35
25	-	0,50	0,39
26	3500	0,51	0,40
21	3000	0,58	0,46
20	-	0,60	0,49
17	-	0,66	0,54
18	2500	0,67	0,54

(*) Medida en cilindros estándar. Aplicable a cementos: Portland corriente (Tipos I, IA), Portland modificado (Tipos II, IIA), Portland de endurecimiento rápido (Tipos III, IIIA), Portland resistente a sulfatos (Tipo V); también Portland Siderúrgico (Tipos IS, IS-A) y Portland puzolánico (Tipos IP, P, I(PM), IP-A) incluyendo cementos de moderada resistencia a sulfatos (MS).

Nota: el uso de aditivos, aparte de incorporadores de aire, o áridos de baja densidad no es permitido. Los valores de razón Agua absoluta/Cemento son conservadores e incluyen cualquier agua absorbida por los áridos. Por lo tanto, con la mayoría de los materiales, estas razones Agua/Cemento proveerán resistencias promedio superiores a la especificada.



⇒ **Por Condición de Durabilidad**

Tabla 27: Máxima razón Agua/Cemento permitida para hormigón en exposición severa (basada en ACI 201.2R)

Tipo de estructura	Estructura frecuente o continuamente húmeda y expuesta a congelamiento y deshielo *	Estructura expuesta a agua de mar o sulfatos
Secciones delgadas (barandas, rejas, soleras, antepechos, anaqueles, trabajo ornamental) y secciones con menos que 5 mm de recubrimiento sobre el acero	0,45	0,40#
Otro tipo de estructuras	0,50	0,45#

(*) El hormigón debería tener también aire incorporado.

(#) Si se usa cemento resistente a sulfatos (Tipos II o V de ASTM C 150) se puede aumentar la razón Agua/Cemento permitida en 0,05.

***ELEGIR LA MENOR RAZON W/C
ENTRE LAS DOS CONDICIONES***



➤ *Determinación del tamaño máximo*

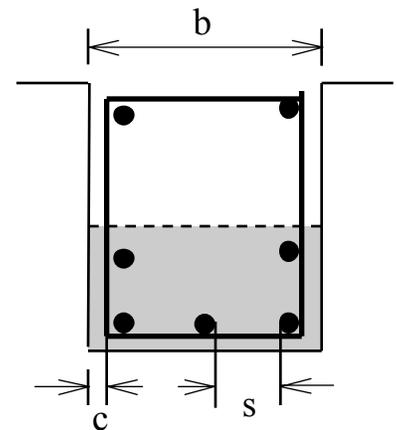
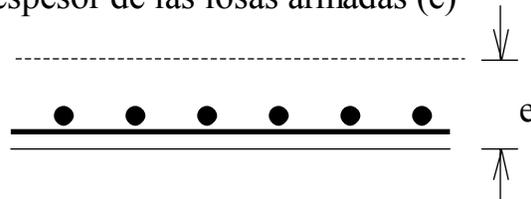
La determinación del tamaño máximo aceptable del árido más grueso de la dosificación del hormigón se efectúa con Tabla 28 que establece un rango de tamaños máximos aplicables a diversos elementos estructurales en función de la dimensión mínima de la sección. El TM debe precisarse en el rango señalado, aumentándolo mientras mayor sea la dimensión del elemento.

Tabla 28: Tamaño máximo recomendado (mm.) en función de la dimensión mínima de la sección (ACI)

Dimensión Mínima de la Sección (cm)	Tamaño Máximo Recomendado en [mm.]			
	Muros armados, vigas y pilares	Muros sin armadura	Losas muy armadas	Losa débilmente armada o sin armadura.
6 - 12	12,5 - 20	20	20 - 25	20 - 40
14 - 28	20 - 40	40	- 40	40 - 75
30 - 74	40 - 75	75	40 - 75	- 75
≥ 76	40 - 75	150	40 - 75	75 - 150

Según la norma ACI 211.1-81

$$D_n < \begin{cases} 1/5 \text{ de la menor dimensión interna del encofrado (b)} \\ 3/4 \text{ del espacio libre entre armaduras (s)} \\ 1/3 \text{ del espesor de las losas armadas (e)} \end{cases}$$



NOTAS: Usar el mayor tamaño máximo económicamente disponible y consistente con las dimensiones de la estructura.

Cuando se desea hormigón de alta resistencia se pueden obtener mejores resultados con el uso de áridos de menor tamaño máximo nominal ya que estos producen mayores resistencias para una razón W/C dada.



➤ *Determinación de la fluidez*

La fluidez que se desea otorgar al hormigón queda definida en este método en base al asentamiento de cono, el que se puede establecer usando como referencia la Tabla 29. Esta Tabla define un rango aceptable de asentamientos para diversos tipos de elementos estructurales. Debe señalarse que esta definición es relativamente imprecisa, pues, por una parte, el rango señalado es bastante amplio y, por otra, la gama de elementos estructurales considerados es restringida y delimitada en forma poco precisa.

Tabla 29: Asentamientos de cono recomendados para diferentes tipos de construcción (ACI 211.1 - Rev. 1985)

Tipo de construcción	Rango de Asentamiento de Cono [cm]
Fundaciones armados y bases	2 – 8
Fundaciones hormigón simple y muros de sub-estructura	2 – 8
Vigas y muros armados	2 – 10
Columnas de edificios	2 – 10
Pavimentos y losas	2 – 8
Hormigón masivo	2 – 8

Nota: Límites superiores pueden aumentarse en 2 [cm] para compactación manual.

Por las razones expuestas, la determinación del asentamiento de cono más conveniente debe complementarse con otros elementos de juicio y la experiencia del usuario.

➤ *Determinación de la consistencia*

La consistencia más apropiada para el hormigón se establece en función de las proporciones de árido grueso y fino incorporadas y se determinada directamente al proceder al cálculo de las cantidades de áridos en la forma definida en la Tablas 32 o 33.

Uno de los parámetros de entrada considerados en ella lo constituye el módulo de finura de la arena, procedimiento que emplea este método para reflejar la influencia granulométrica de la arena.

El procedimiento señalado es bastante simple en su aplicación, pero adolece de falta de precisión en su definición.



➤ *Determinación de la dosis de agua*

Se emplea la Tabla 30 ó 31, que establece la cantidad de agua expresada en l/m³ de hormigón colocado y compactado, en función del asentamiento de cono definido y del tamaño máximo determinados anteriormente.

Se debe distinguirse el caso del empleo de aire incorporado, ya que éste permite una reducción de la dosis de agua por su efecto plastificador. Esta misma parte de la tabla puede emplearse en el caso de haber previsto el uso de un aditivo plastificador.

Tabla 30: Requerimientos aproximados para dosis de agua (kg/m³) y contenido de aire (%) para diferentes trabajabilidades y tamaños máximos nominales de áridos (ACI 211.1- Rev. 1985)

Trabajabilidad [cm] o contenido aire	Vebe [seg.]	Tamaño máximo del árido [mm.]							
		10	12,5	20	25	40	50	70	150
Hormigón sin aire incorporado									
3 – 5	5-3	205	200	185	180	160	155	145	125
8 – 10	3-0	225	215	200	195	175	170	160	140
15 – 18	0	240	230	210	205	185	180	170	-
Cantidad aire atrapado aproximado (%)		3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
Hormigón con aire incorporado									
3 – 5	5-3	180	175	165	160	145	140	135	120
8 – 10	3-0	200	190	180	175	160	155	150	135
15 – 18	0	215	205	190	185	170	165	160	-
Cant. de aire total promedio recomendada (%)									
Exposición suave		4,5	4,0	3,5	3,0	2,5	2,0	1,5*	1,0*
Exposición moderada		6,0	5,5	5,0	4,5	4,5	4,0	3,5*	3,0*
Exposición extrema #		7,5	7,0	6,0	6,0	5,5	5,0	4,5*	4,0*

Valores de asentamiento para hormigón con árido mayor que 40 mm basados en ensayos de asentamiento hechos después de remover las partículas mayores a 40 mm por tamizado húmedo.

Dosis de agua para tamaños máximo nominal de 75 y 150 mm. son valores promedio para áridos gruesos razonablemente bien formados y bien graduados desde grueso a fino.

(*) Para hormigón que contiene áridos de gran tamaño y que será tamizado con agua en malla de 40 mm antes del ensayo de contenido de aire, el porcentaje de aire esperado en el material menor que 40 mm debe ser aquel tabulado en la columna de 40mm. Sin embargo, los cálculos de dosificación inicial deberán estar basados en la dosis de aire como un porcentaje de la mezcla total.



(#) Estos valores están basados en el criterio que un contenido de aire de 9% se necesita en la fase mortero del hormigón.



Tabla 31: Cantidad de agua y contenido de aire en [l/m³] recomendada para diferentes asentamientos y tamaños máximos de áridos (adaptación IDIEM a ACI 211)

Asentamiento [cm]	Vebe [seg]	Tamaño máximo de agregado [mm]							
		10	12,5	20	25	40	50	75	150
Hormigón sin aire incorporado									
0	32-18	178	168	158	148	138	128	-	-
0	18-10	188	183	168	158	148	138	128	-
0-2	10-5	198	193	178	168	158	148	139	-
2-6	5-3	208	198	183	178	163	154	144	124
8-10	3-0	228	218	203	193	178	168	158	139
16-18	0	243	228	213	203	188	178	168	148
Cant. aire atrapado aproximado		30	25	20	15	10	5	3	2
Hormigón con aire incorporado									
0	32-18	158	148	138	133	123	-	-	-
0	18-10	168	158	148	138	133	120	-	-
0-2	10-5	178	168	158	148	138	128	-	-
2-6	5-3	183	178	163	153	143	133	123	109
8-10	3-0	203	193	178	168	158	148	139	119
16-18	0	213	203	188	178	168	150	148	129
Cant. de aire total recomendada		80	70	60	50	45	40	35	30

Las dosis de agua dadas para hormigón con aire incorporado están basadas en requisitos típicos de dosis de aire total para exposición moderada. Estas cantidades de agua son para uso en el cálculo de la dosis de cemento para mezclas de prueba a 20 - 25°C. Son máximas para áridos angulares razonablemente bien formados graduados dentro de límites de especificaciones aceptadas. Áridos gruesos rodados requerirán generalmente 18 o 15 kg. de menos agua para hormigón sin o con aire incorporado, respectivamente. El uso de aditivos reductores de agua, ASTM C494, pueden también reducir la dosis de agua en 5% o más. El volumen de aditivos líquidos se incluye como parte del volumen total de agua de mezclado.



➤ *Determinación de la dosis de cemento*

La dosis de cemento se determina en base al cociente entre la dosis de agua determinada y la razón agua/cemento definida.

En el caso de haberse previsto el empleo de un incorporador de aire, la cantidad de aire incorporado debe sumarse a la dosis de agua para el efecto del cálculo de la dosis de cemento.

$$C = \frac{(W + a)}{W/C} \quad (\text{kg/m}^3)$$



➤ *Determinación de la dosis de grava*

Se determina a partir de la Tabla 32 ó 33 y 34, en función del módulo de finura de la arena y al tamaño máximo.

La dosis de grava aparece expresada en litros por metro cúbico, debiendo, en consecuencia, multiplicarse por la densidad aparente de la grava en caso de desear expresarla en kilos por metro cúbico, determinada en condición compactada en seco.

Tabla 32: Volumen aparente de árido grueso seco por metro cúbico de hormigón [l/m^3] (ACI 211.1- Rev. 1985)

Tamaño máximo del árido [mm.]	Volumen aparente seco compactado de árido grueso * para Módulo de Finura de la Arena de:			
	2,40	2,60	2,80	3,00
10	500 (460)	480 (440)	460 (420)	440 (400)
12,5	590 (550)	570 (530)	550 (510)	530 (490)
20	660 (650)	640 (630)	620 (610)	600 (590)
25	710 (700)	690 (680)	670 (660)	650 (640)
40	750 (760)	730 (740)	710 (720)	690 (700)
50	780 (790)	760 (770)	740 (750)	720 (730)
75	820 (840)	800 (820)	780 (800)	760 (780)
150	870 (900)	850 (880)	830 (860)	810 (840)

* Entre paréntesis valores propuestos por Zabaleta.

Los valores dados producirán una mezcla con trabajabilidad satisfactoria para construcción de hormigón armado. Para hormigón menos trabajable, por ejemplo el usado en pavimentos, los valores pueden ser aumentados alrededor de un 10%. Para hormigón más trabajable, tales como bombeados, los valores se pueden reducir en hasta un 10%.

La masa seca de árido grueso en kg/m^3 requerida para un metro cúbico de hormigón es igual al valor de la tabla multiplicada por la densidad aparente seca compactada del árido.



IDIEM y Zabaleta proponen otros valores para usar el método ACI calibrado a condiciones chilenas. Particularmente, IDIEM aumenta o disminuye en 10 litros/m³, para tamaños máximos de 40 y 75 mm, respectivamente, los volúmenes propuestos por ACI y los especifica sólo para un asentamiento de cono = 10 cm.

Tabla 33: Volumen aparente de árido grueso por unidad de volumen de hormigón [l/m³] (IDIEM y Zabaleta)

Tamaño máximo del árido [mm.]	Volumen aparente seco compactado de árido grueso * para Módulo de Finura de la Arena de:			
	2,40	2,60	2,80	3,00
10	500 (460)	480 (440)	460 (420)	440 (400)
12,5	590 (550)	570 (530)	550 (510)	530 (490)
20	660 (650)	640 (630)	620 (610)	600 (590)
25	710 (700)	690 (680)	670 (660)	650 (640)
40	760 (760)	740 (740)	720 (720)	700 (700)
50	780 (790)	760 (770)	740 (750)	720 (730)
75	810 (840)	790 (820)	770 (800)	750 (780)
150	870 (900)	850 (880)	830 (860)	810 (840)

* Entre paréntesis valores propuestos por Zabaleta.

** Valores de IDIEM son para descenso de cono = 10 cm. = V^*_{G10}

Para usar éstos valores con otro asentamiento el IDIEM creó la Tabla de factores de corrección K, en que el volumen aparente de árido grueso viene dada por:

$$V^*_G = K * V^*_{G10}$$

Tabla 34: Factores de corrección K de la dosis de árido grueso método IDIEM.

Asentamiento [cm]	Vebe [seg]	Tamaño Máximo árido (mm)							
		10	12,5	20	25	40	50	75	150
0	32 – 18	1,45	1,35	1,22	1,20	1,18	1,16	1,14	1,12
0	18 – 10	1,30	1,22	1,15	1,12	1,12	1,14	1,10	1,08
0 – 2	10 – 5	1,18	1,15	1,08	1,08	1,10	1,10	1,10	1,10
2 – 6	5 – 3	1,04	1,03	1,02	1,02	1,04	1,04	1,04	1,04
8 – 10	3 – 0	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
14 – 18	0	0,97	0,98	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00



➤ *Determinación de la dosis de arena*

⇒ **Método Volumétrico:**

Se determina partiendo del hecho que la suma de los volúmenes absolutos de agua, cemento, aire incorporado (o atrapado), grava y arena debe ser igual a un metro cúbico. Ello permite definir el volumen absoluto de arena, el cual, multiplicado por la densidad real (peso específico) de la arena, conduce al valor de la dosis de arena, expresada en kilos por metro cúbico.

La masa de árido fino o arena, A_f , está dada por:

$$A_f \quad [\text{kg/m}^3] = \gamma_f \left[1000 - \left(W + \frac{C}{\gamma} + \frac{A_g}{\gamma_g} + 10a \right) \right]$$

en que:

γ_f = densidad real sss o peso específico del árido fino (arena).

γ_g = densidad real sss o peso específico del árido grueso (grava).

γ = peso específico del cemento (generalmente 3,15 en USA y 3,0 en Chile)

A_g = dosis de árido grueso o grava

a = dosis de aire (%)

C = dosis de cemento (kg/m^3)

W = dosis de agua (kg/m^3)

⇒ **Método de Densidad:**

También se puede determinar del hecho que la suma de las dosis en peso de los distintos materiales es igual a la densidad o peso por m^3 del hormigón. Para esto se utiliza un valor estimado de la densidad dado por la Tabla 35.

Dosis de arena: $A_f = D - C - W - A_g$

con D = densidad hormigón fresco compactado [kg/m^3]

C = dosis cemento [kg/m^3]

W = dosis agua libre [kg/m^3]



A_g = dosis de árido grueso o grava



➤ Cálculo de la Densidad Fresca del Hormigón

Tabla 35: Primera estimación de la densidad del hormigón fresco. (ACI 211.1-Rev. 1985)

Tamaño máximo del árido [mm]	Primera estimación de la densidad del hormigón fresco	
	Sin aire incorporado [kg/m ³]	Con aire incorporado [kg/m ³]
10	2280	2200
12,5	2310	2230
20	2345	2275
25	2380	2290
40	2410	2350
50	2445	2345
75	2490	2405
150	2530	2435

Una forma más precisa de estimar la densidad del hormigón fresco compactado se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\rho \text{ [kg/m}^3\text{]} = 10\gamma_a(100 - a) + C\left(1 - \frac{\gamma_a}{\gamma}\right) - W(\gamma_a - 1)$$

en que:

ρ = densidad del hormigón fresco

γ_a = densidad real sss o peso específico ponderado del árido combinado fino y grueso. Claramente, esto requiere ser determinado de ensayos.

γ = peso específico del cemento (generalmente 3,15 en USA y 3,0 en Chile)

a = dosis de aire (%)

C = dosis de cemento (kg/m³)

W = dosis de agua (kg/m³)



➤ *Comentarios y Limitaciones*

Los conceptos contenidos en los párrafos anteriores permiten señalar algunos antecedentes en relación con la aplicación del Método de Dosificación del American Concrete Institute:

✓ Definición de parámetros previos a la determinación de la dosificación.

El empleo del Método hace necesario el conocimiento de algunas características de los materiales que se emplearán para su aplicación, los cuales pueden resumirse en la siguiente lista:

- Densidad real (peso específico) y densidad aparente compactada de la grava.
- Granulometría y densidad real (peso específico) de la arena.
- Características geométricas del elemento estructural que se va a hormigonar.

a los cuales deben agregarse los señalados en los conceptos generales sobre dosificación: tipo de cemento y empleo de aditivos.

✓ Limitaciones del método:

Tal como se señaló anteriormente, una de las principales limitaciones del método lo constituye el hecho de poder emplearse sólo con dos áridos.

Adicionalmente, es necesario observar que su aplicación hace necesario que la grava presente una granulometría aceptable, cumpliendo las condiciones definidas en NCh 163, condición que se supone implícita, puesto que no se hace intervenir explícitamente en las tablas que se emplean.



➤ Ejemplos de Dosificación usando el Método ACI

Ejemplo B

Dosificar utilizando el Método ACI un hormigón H20 a 28 días con 10% de defectuosos para una losa de 15 cm. de espesor y enfierradura $\phi 12@15$.

Esta losa estará protegida.

Se conoce la desviación estándar de la obra : $s = 4$ MPa.

Se usará hormigón convencional compactado con vibrador de inmersión y transportado con grúa y capacho.

Se especifica uso de incorporador de aire.

Utilizar Cemento corriente.

La densidad real del cemento es 3 kg/dm^3 .

Propiedad	Arena	Grava
Tipo	Rodada	Chanc.
Densidad Aparente [kg/dm^3]	1,800	1,650
Peso específico	2,650	2,700
M.F	2,85	

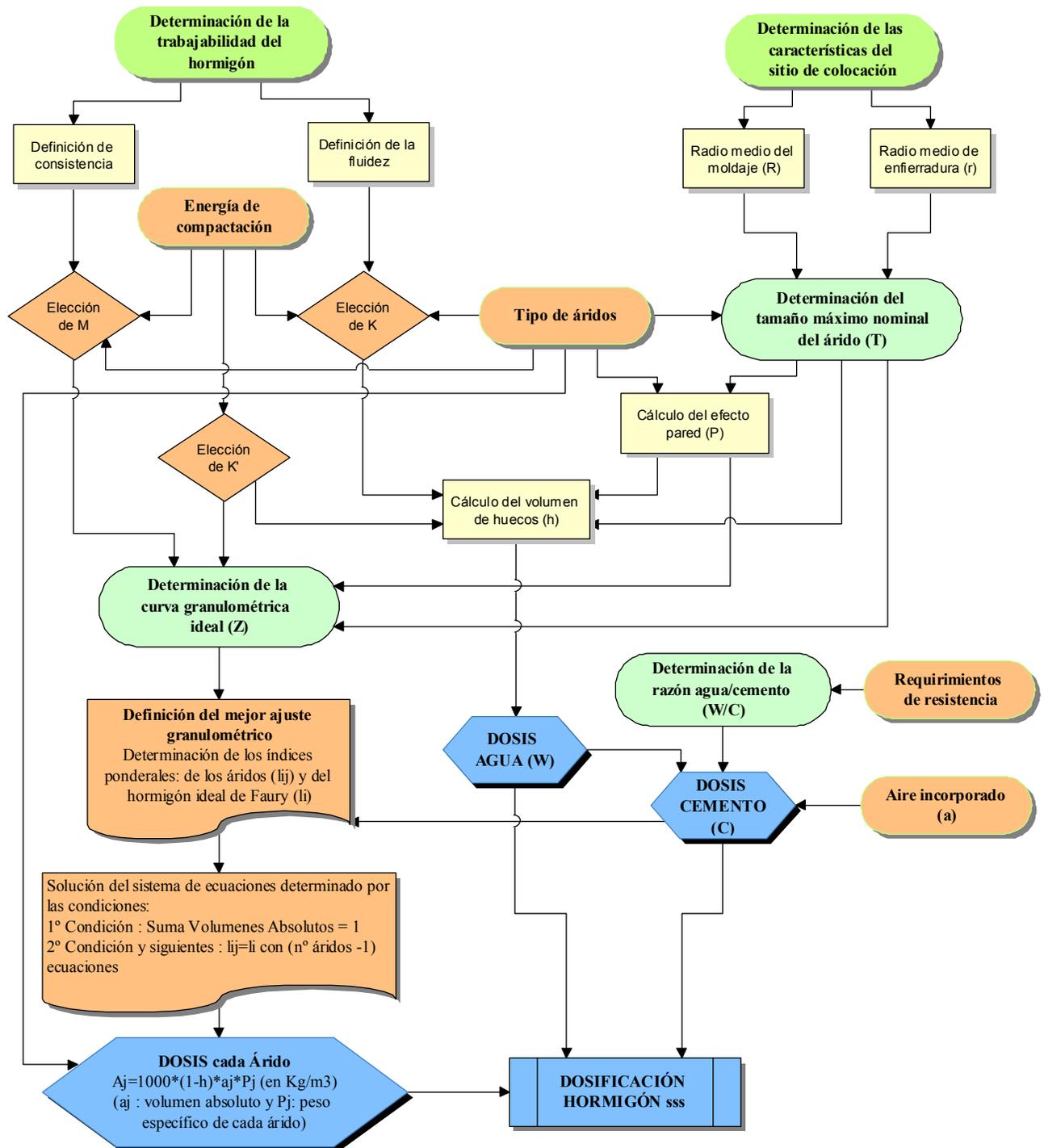


• METODO FAURY

- ✓ Se fundamenta esencialmente en principios granulométricos para determinar las cantidades de los materiales que permiten otorgar a un determinado hormigón las características previstas.
- ✓ Se basa en las experiencias realizadas por su propio autor, las que constituyen una continuación de las que ya anteriormente habían ejecutado sobre principios similares otros investigadores tales como Fuller y Bolomey y principalmente Caquot, quien le proporciona el fundamento teórico de los conceptos de mayor importancia contenidos en el método.
- ✓ Define una Curva Granulométrica Ideal sobre la base de las características del hormigón deseado y los materiales disponibles.
- ✓ El procedimiento se divide en cinco partes:
 - ⇒ *Determinación del tamaño máximo del árido*
 - ⇒ *Determinación de la fluidez del hormigón (dosis agua)*
 - ⇒ *Elección de la curva granulométrica ideal (consistencia)*
 - ⇒ *Determinación de la razón agua/cemento*
 - ⇒ *Determinación de la dosificación (ajuste granulométrico)*



► Diagrama de Flujo del Método Faury



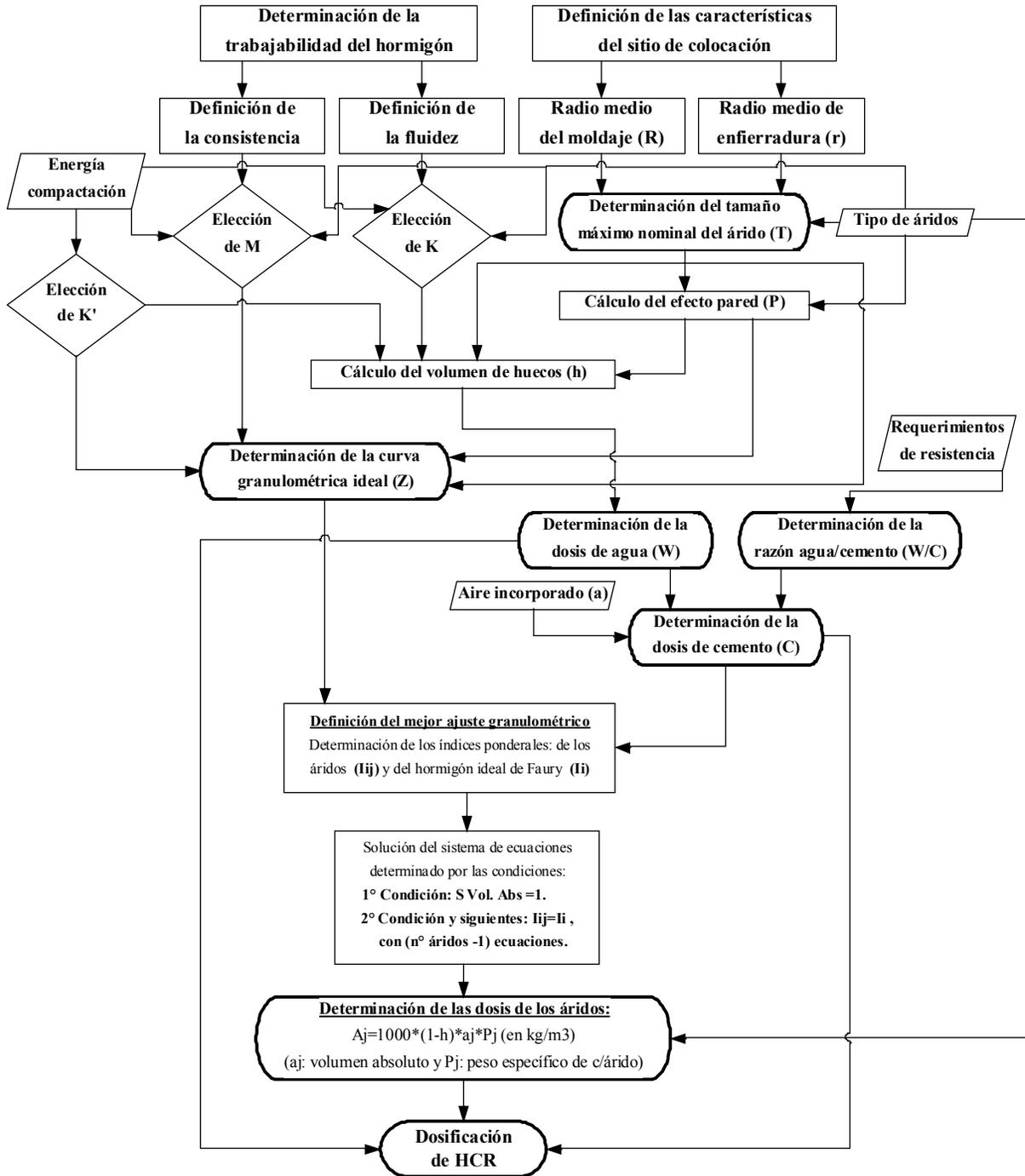
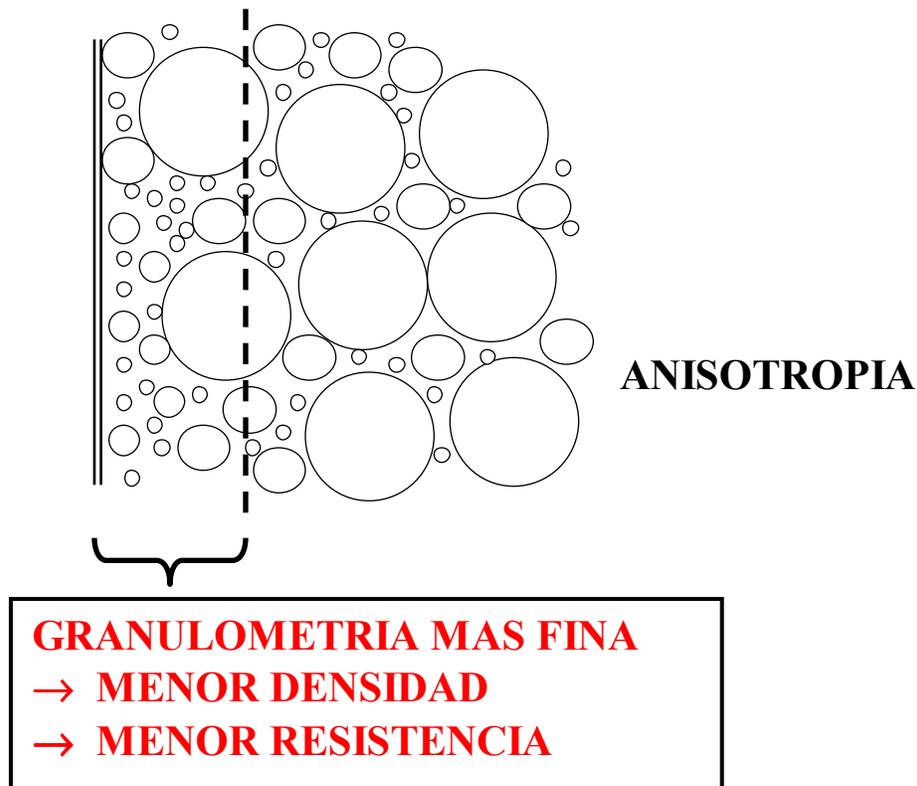


Fig.21: Diagrama de flujo del método de dosificación de Faury para hormigones convencionales



➤ *Determinación del tamaño máximo*

El Método de Faury se basa en el criterio denominado efecto de pared, desarrollado por el investigador francés Caquot, que cuantifica el efecto que una superficie dura ejerce sobre la porosidad de un material granular en la zona adyacente a ella. Este efecto se deriva del desplazamiento que sufren las partículas con respecto a la posición que ocuparían si el material estuviera colocado en una masa indefinida, es decir, si no existiera la superficie que produce la interferencia.



La aplicación de este criterio al efecto de pared derivado de la presencia de moldajes y enfierraduras presentes en todo elemento de hormigón es usado por Faury para determinar el tamaño máximo del árido más grueso contenido en el hormigón.



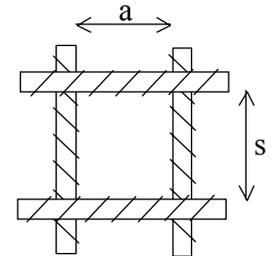
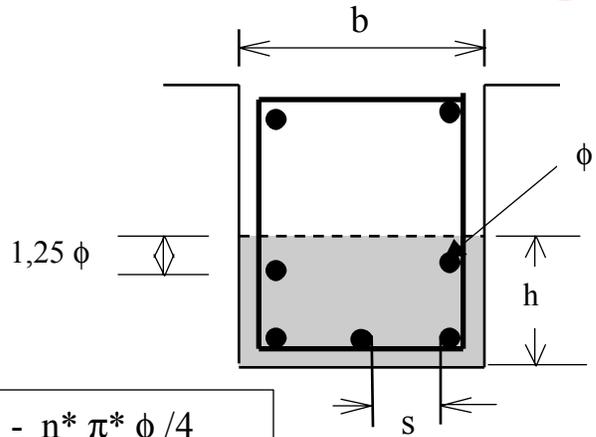
Se definen dos parámetros:

• **Radio Medio de Moldaje:**

$$R = \frac{\text{Volumen del elemento}}{\text{Superficie (moldaje + armadura)}}$$

$$R = \frac{\text{Sección neta hormigón}}{\text{Perímetro (moldaje + armadura)}}$$

$$R = \frac{b \cdot h - n \cdot \pi \cdot \phi / 4}{b + 2 \cdot h + n \cdot \pi \cdot \phi}$$



• **Radio Medio de Armadura:**

$$r = \frac{\text{Superficie libre entre las armaduras}}{\text{Perímetro correspondiente a la superficie}} = \frac{as}{2(a + s)}$$

Considerar los siguientes conceptos para su cálculo:

- superficie de moldajes incluida en denominador del radio medio de moldaje es la de los moldes que limitan el volumen del elemento. Si presenta una cara libre sometida a terminación superficial, ella también debe ser considerada;
- superficie de enfierraduras corresponde a la superficie externa de las barras de armadura embebidas en el elemento;
- armadura consideradas en el cálculo del radio medio de la enfierradura son aquellas a través de las cuales debe atravesar el hormigón y la superficie libre es la que atraviesa el hormigón;
- el perímetro a considerar es el que rodea dicha superficie.

Las expresiones propuestas por Faury para determinar el tamaño máximo son las contenidas en la Tabla 36:

TABLA 36: Determinación del tamaño máximo (Faury)

Tipo de árido	R/r	Tamaño Máximo	P
Rodado	> 1,4	> 1,12 r	T/1,45r
	≤ 1,4	≤ 0,80 R	T/R
Chancado	> 1,2	> 0,96 r	T/1,25r
	≤ 1,2	≤ 0,90 R	T/R

NOTA: La última columna de Tabla 36 representa el valor del efecto de pared que debe considerarse en otras expresiones que se verán posteriormente.





➤ *Determinación de la fluidez (dosis de agua).*

Queda establecida en el Método de Faury a través de la fijación del contenido de huecos para cada curva granulométrica ideal, que al ser llenados por el agua de amasado, determinará dicha característica del hormigón.

La expresión para determinar el porcentaje unitario de huecos es la siguiente:

$$h = \frac{K}{\sqrt[5]{T}} + \frac{K'}{\frac{0,80}{P} - 0,075}$$

Los valores de los coeficientes K (dependen del grado de compactación aplicado al hormigón) y K' quedan a su vez definidos de acuerdo a las Tablas 37-38 y 39.

Tabla 37: Valores de K (Faury)

Fluidez	Compactación	Naturaleza de los áridos		
		Arena rodada Grava rodada	Arena rodada Grava chancada	Arena chancada Grave chancada
Muy fluida	Nula	0.355 o más	0.379 o más	0.440 o más
Blanda	Media	0.335 – 0.355	0.360 – 0.380	0.410 – 0.440
Plástica	Cuidadosa	0.315 – 0.335	0.340 – 0.360	0.385 – 0.410
De tierra húmeda	Muy potente	0.240 – 0.315	0.315 – 0.335	0.335 – 0.385
Extra seca	Excepcional	0.240 o menos	0.315 o menos	0.335 o menos

Tabla 38: Valores de K (Faury modificados por Zabaleta)

Asentamiento cono (cm)	Compactación	Naturaleza de los áridos		
		Arena rodada Grava rodada	Arena rodada Grava chancada	Arena chancada Grave chancada
12 - 15	nula	0.380 - 0.390	0.405 - 0.415	0.430 - 0.440
10 - 12	débil	0.370 - 0.380	0.395 - 0.405	0.420 - 0.430
8 - 10	media	0.360 - 0.370	0.385 - 0.395	0.410 - 0.420
6 - 8	cuidadosa	0.350 - 0.360	0.375 - 0.385	0.400 - 0.410
4 - 6	potente	0.340 - 0.350	0.365 - 0.375	0.390 - 0.400
2 - 4	muy potente	0.330 - 0.340	0.355 - 0.365	0.380 - 0.390
0 - 2	excep. potente	0.320 - 0.330	0.345 - 0.355	0.370 - 0.380

**Tabla 39: Valores de K' (Faury)**

Compactación	K'
Normal	0.003
Potente	0.002

Los valores de K deben ser elegidos principalmente en función del asentamiento de cono que se desea dar al hormigón, debiendo entenderse que la glosa relativa a compactación significa que ésta debe ser hecha por vibración para las designadas cuidadosa a excepcionalmente potente, prolongando el tiempo de vibración hasta lograr la total compactación del hormigón. En las compactaciones señaladas como nula a media pueden también emplearse medios menos potentes, como ser varillado.



➤ **Elección de la curva granulométrica ideal (determinación de la consistencia).**

Se establece básicamente a través de una granulometría total adecuada. Para este objeto, el método propone una **Curva Granulométrica de Referencia o Curva Ideal**, la que incluye al cemento, que puede ser variada de acuerdo a las características que se desee conferir al hormigón. La forma general y los parámetros que la determinan son los que aparecen en la Fig. 22.

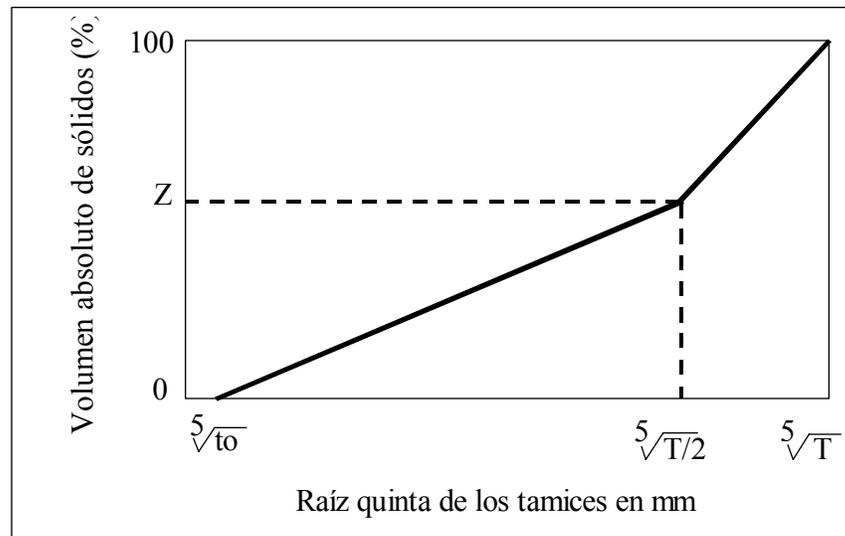


Fig. 22: Curva Granulométrica Ideal de Faury

Es necesario hacer las siguientes acotaciones respecto a la curva propuesta:

- la escala de abcisas corresponde a los tamaños de partículas, representada proporcionalmente a la raíz quinta de su tamaño; $t_0 = 0,0065$
- la escala de ordenadas corresponde a la proporción en volumen real presente en el hormigón de partículas de un tamaño dado con respecto al volumen real total de partículas sólidas, incluido el cemento;
- el punto de quiebre de los dos tramos rectos que componen la Curva Ideal queda definido por las siguientes coordenadas.

Abcisa : $T/2$, siendo T el tamaño máximo del árido más grueso

$$\text{Ordenada : } Z = M + 17,8 \sqrt[5]{T} + \frac{500 K'}{0,80/P - 0,75}$$

el coeficiente K' tiene el mismo valor adoptado para determinar la fluidez.



Los parámetros T y $500K'/(0,80/P-0,75)$ quedan definidos en base al criterio denominado “efecto pared”

- el valor del coeficiente M queda determinado por la Tabla 40. Representa el grado de consistencia del hormigón (finos).

Tabla 40: Valores de M (Faury)

Consistencia	Compactación	Naturaleza de los áridos		
		Arena rodada Grava rodada	Arena rodada Grava chancada	Arena chancada Grava chancada
Muy fluida	Nula	32 o más	34 o más	38 o más
Fluida	Débil	30 - 32	32 - 34	36 - 38
Blanda	Media	28 - 30	30 - 32	34 - 36
Plástica	Cuidadosa	26 - 28	28 - 30	32 - 34
Muy firme	Potente	24 - 26	26 - 28	30 - 32
De tierra húmeda	Muy potente	22 - 24	24 - 26	28 - 30
Extra seca	Excep. potente	22 o menos	26 o menos	28 o menos

En esta Tabla se ha supuesto que la consistencia está ligada a la fluidez a través de la compactación necesaria, lo cual implica que los coeficientes K y M deben ser elegidos para igual condición de compactación.



➤ *Determinación de la razón agua/cemento.*

Para este objeto se puede seguir el mismo criterio señalado al respecto en el Método Inglés o ACI de dosificación.

➤ *Determinación de la dosificación.*

Las condiciones de partida señaladas en los párrafos anteriores permiten calcular las cantidades en que los diferentes componentes del hormigón deben mezclarse para obtener las características previstas. El procedimiento para este objeto es el que se describe a continuación:

➤ *Determinación de la dosis de agua.*

En función de los valores del porcentaje de huecos establecido en la forma señalada anteriormente se puede determinarse la dosis de agua expresada en litros por metro cúbico mediante la expresión:

$$A = 1000 \cdot h$$

➤ *Determinación de la dosis de cemento.*

La dosis de cemento es posible determinarla en base al cociente entre la dosis de agua determinada en la forma señalada en el párrafo anterior y la razón agua/cemento definida.

En el caso de haberse previsto el empleo de un incorporador de aire, la cantidad de aire incorporado debe sumarse a la dosis de agua para el efecto del cálculo de la dosis de cemento.

$$C = \frac{(W + a)}{W/C} \quad (\text{kg/m}^3)$$





➤ *Determinación de las dosis de áridos.*

La determinación de las dosis de áridos debe efectuarse estableciendo proporciones para cada uno de ellos, de manera tal que la curva granulométrica total obtenida mezclándolos en dichas proporciones logre el mejor ajuste posible a la **Curva Ideal** obtenida en la forma señalada anteriormente. Para este objeto, Faury ha propuesto un sistema, denominado de los **Indices Ponderales**, el cual permite obtener este ajuste óptimo tomando en cuenta la diferente importancia granulométrica de las partículas componentes en función de su tamaño. Este Índice Ponderal aparece definido en la Fig. 23, para cada partícula de un tamaño determinado.

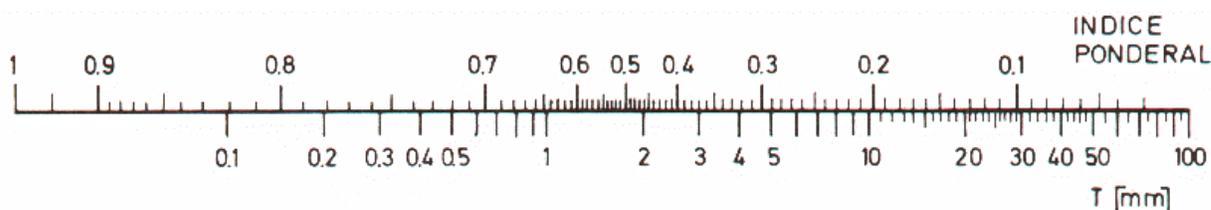


Fig. 23: Indices Ponderales

Sin embargo, su aplicación debe tener en consideración que un árido está compuesto de partículas de diferente tamaño en proporciones que se determinan mediante su análisis granulométrico efectuado empleando una serie normalizada de mallas. Por este motivo, se asigna a las partículas comprendidas entre dos mallas sucesivas el valor promedio definido por el gráfico antes mencionado.

En la Tabla 41 indica dichos Indices Ponderales para los tamaños de partículas correspondientes a una granulometría efectuada por la serie normal ASTM.

Tabla 41: Indices ponderales (Faury)

Tamiz	3"	2"	1½"	1"	¾"	½"	⅜"	#4	#8	#16	#30	#50	#100
(mm)	75	50	40	25	20	12,5	10	5	2,5	1,25	0,63	0,31	0,15
I.Pond	0,038	0,054	0,087	0,119	0,152	0,189	0,246	0,340	0,496	0,664	0,730	0,774	0,955

En esta tabla el Índice Ponderal ha sido calculado para las partículas de tamaño comprendido entre dos mallas sucesivas de la serie y anotado frente a la malla de tamaño superior.



Los valores señalados permiten definir el Índice Ponderal del Árido, calculado como la suma de los productos de los porcentajes granulométricos comprendidos entre dos mallas sucesivas por el Índice Ponderal correspondiente a las aberturas de los tamices relacionados con cada porcentaje granulométrico. Para este objeto hay que calcular los porcentajes acumulados usando las ecuaciones para graficar:

$$t < \frac{T}{2} \quad z(t) = Z \frac{\sqrt[5]{t} - \sqrt[5]{0.0052}}{\sqrt[5]{\frac{T}{2}} - \sqrt[5]{0.0052}} \quad \%$$

$$\frac{T}{2} < t < T \quad \frac{100 - Z}{\sqrt[5]{T} - \sqrt[5]{\frac{T}{2}}} \sqrt[5]{t} + \frac{Z - 100\sqrt[5]{0.5}}{1 - \sqrt[5]{0.5}} \quad \%$$

A su vez, es posible calcular el Índice Ponderal del Árido Combinado, determinado mediante la suma de los productos de los Índices Ponderales de los Áridos por un determinado porcentaje de mezcla de dichos áridos.

Este mismo procedimiento es posible aplicarlo a la Curva Ideal, considerando los porcentajes granulométricos que ella define.

Sobre las bases enunciadas, el método establece que los porcentajes óptimos de combinación de los áridos se obtienen cuando el **Índice Ponderal del Árido Combinado es igual al de la Curva Ideal**. De esta manera, si para el hormigón se ha previsto el empleo de dos áridos, uno grueso y otro fino, los porcentajes óptimos de combinación se obtienen resolviendo el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\alpha_c + \alpha_f + \alpha_g = 1$$

$$\alpha_c \cdot l_c + \alpha_f \cdot l_f + \alpha_g \cdot l_g = l_i$$

siendo :

α_c, α_f y α_g : porcentajes de volumen real de cemento, árido fino y árido grueso, respectivamente. Estos porcentajes deben expresarse en



proporción del volumen real total de sólidos, puesto que así está definida la Curva Ideal.

El valor de α_c , que corresponde al cemento, es determinado a partir de la dosis de cemento C, mediante la siguiente expresión:

$$\alpha_c = \frac{C}{1000 \cdot (1-h) \cdot \rho_c}$$

l_c, l_f, l_g : índices Ponderales del cemento, árido fino y árido grueso. El correspondiente al cemento debe considerarse igual a 1.

l_i : índice Ponderal de la Curva Ideal Total.

ρ_c : densidad real del cemento

Un procedimiento similar puede emplearse si el número de áridos previstos es superior a dos.

En este caso, dado que el sistema de ecuaciones sería indeterminado, es necesario efectuar tantas igualaciones adicionales de Índices Ponderales como sea la cantidad de áridos sobre dos. Para este objeto, es conveniente elegir como puntos de igualación de los Índices Ponderales de los áridos combinados y de la curva ideal los correspondientes a los tamaños máximos de cada uno de los áridos componentes. Ello permite ampliar el sistema de ecuaciones hasta obtener tantas ecuaciones como áridos intervienen.

De la manera señalada pueden determinarse los porcentajes óptimos de combinación de los áridos y, a partir de ellos, las cantidades por metro cúbico correspondientes a cada uno de ellos de acuerdo a la siguiente expresión general:

$$A_i = 1000 \cdot (1 - h) \cdot \alpha_i \cdot \rho_i$$

siendo :

A_i = cantidad del árido i en kg/m^3

α_i = porcentaje del árido i



$\rho_i =$ densidad real del árido i



Método de Dosificación de Faury

Índice ponderal del árido :

$$I_{ij} = \sum_{k=0}^{k=i} \Delta(\text{Arido } j) * k$$

Índice ponderal de la mezcla:

$$I_{ihorm} = \sum_{j=1}^{j=n} I_{ij} * a_j + c * 1$$

Volumen absoluto cemento :

$$c = \frac{C}{1000 * (1 - h) * P_c}$$

Índice ponderal mezcla ideal:

$$I_i = \sum_{k=0}^{k=i} \Delta(\text{hormigón ideal}) * k$$

Cantidades en m³ :

$$A_j = 1000 * (1 - h) * a_j * P_j$$



➤ **Comentarios al método de Faury.**

El Método Faury para Dosificación de Hormigones presenta un enfoque más flexible que el explicado anteriormente para el Método ACI.

Esta flexibilidad proviene de la introducción de parámetros que permiten definir con mayor precisión las condiciones previstas para el hormigón que se dosifica y a la posibilidad de empleo de tantos áridos como se desee. En las últimas dos décadas se ha utilizado el método Faury para todo tipo de hormigón como se ve reflejado en la Tabla 42 y Fig. 24 y 25.

Tabla 42: Curvas ideales para varios tipos de hormigón de tamaño máximo 40 mm (Zabaleta)

Tipo de hormigón	Asentamiento de cono [cm]	Compactación	Z aproximado
HCR	0	Rodillo vibratorio liso	50 – 60 %
Seco	0 – 4	Vibración	60 – 65 %
Convencional	4 – 8	Vibración	65 – 68 %
Bombeados	8 – 15	Vibración	68 – 72 %
Fluidos	> 15	Autocompactable	72 – 82 %

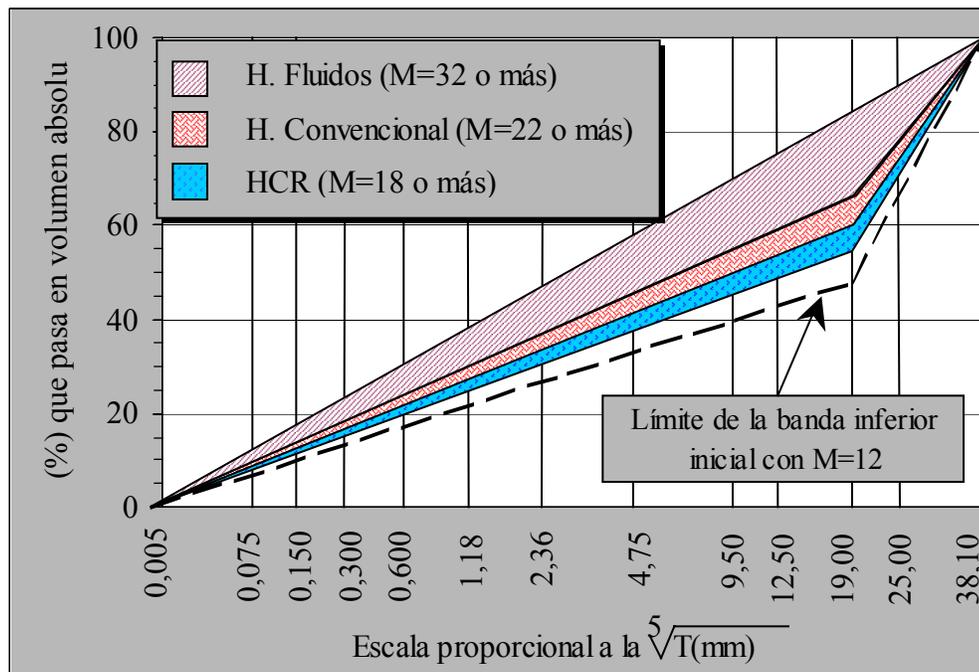


Fig. 24: Curvas ideales para varios tipos de hormigón de tamaño máximo 40 mm (Zabaleta)

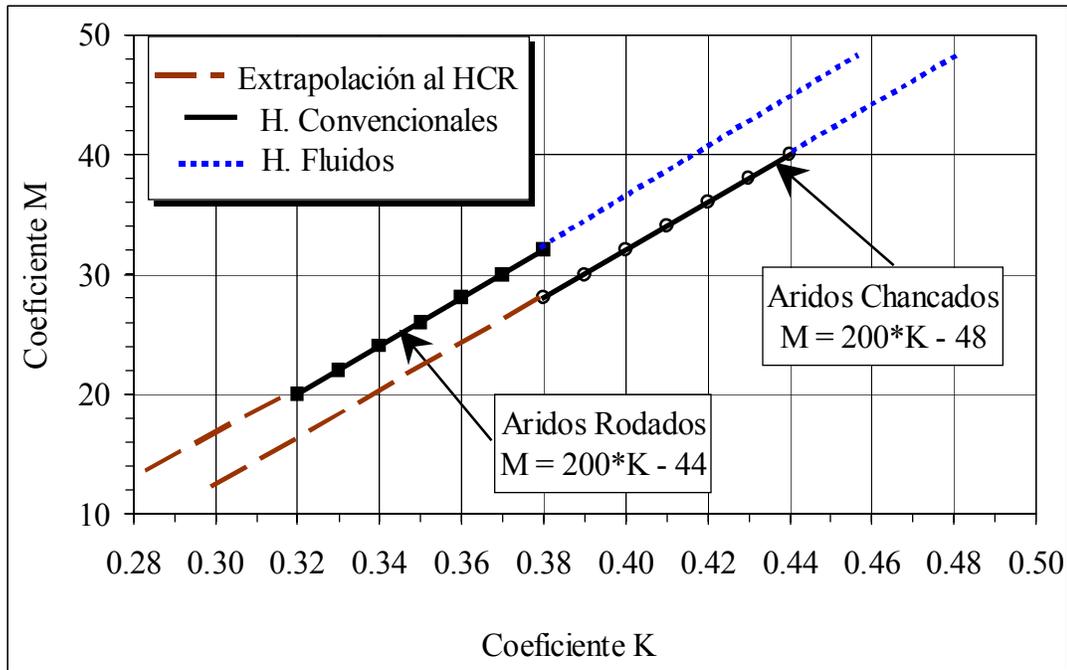
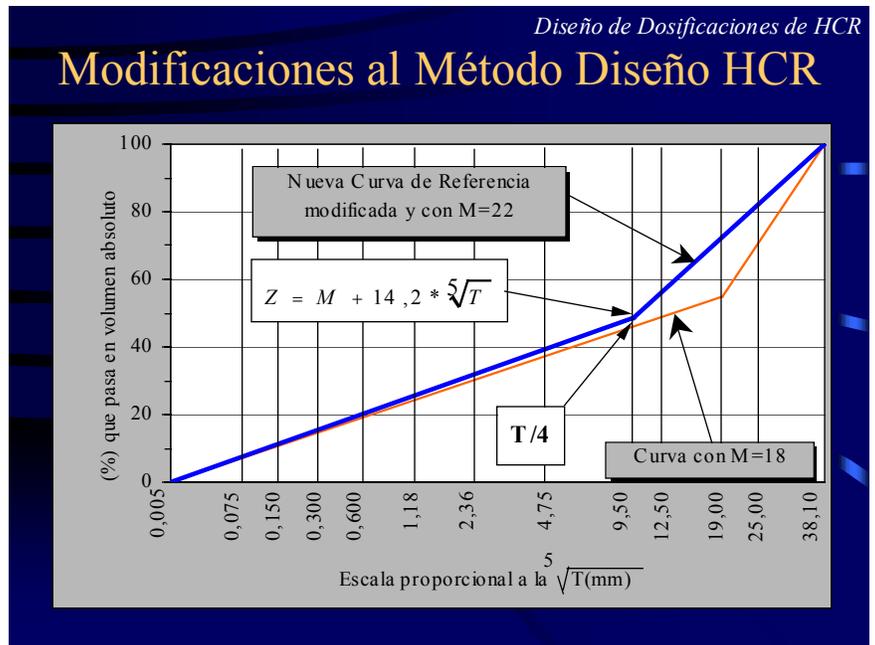


Fig. 25: Extrapolación de coeficientes del Método de Faury (Zabaleta)

Su mayor inconveniente proviene de la mayor complejidad de las operaciones de cálculo, aspecto que actualmente resulta fácil de superar mediante el empleo de computadora para su ejecución.

Investigaciones recientes permiten recomendar las modificaciones al método de Faury mostradas en la Fig. 26 cuando se aplica a hormigón rodillado:





➤ Ejemplos de Dosificación usando el Método Faury

Ejemplo C

Dosificar utilizando el Método Faury un hormigón de 25 MPa a 28 días con 10% de defectuosos para un muro de 15 cm de espesor y enfierradura doble malla ϕ 8 @ 15.

Se conoce la desviación estándar de la obra : $s = 5$ MPa.

Este muro estará sometido a ciclos hielo-deshielo.

Se usará hormigón convencional compactado con vibrador de inmersión y transportado con grúa y capacho.

Utilizar los áridos indicados en tabla adjunta.

Utilizar Cemento corriente con densidad real del cemento de 3 kg/dm^3 .

Tamiz [mm]	Porcentaje que pasa		
	Grava	Gravilla	Arena
40	100		
25	47		
20	14	100	
12.5	1	70	
10		36	100
5		2	78
2.5		1	60
1.25			45
0.63			29
0.32			12
0.16			4
Densidad real	2,72	2,71	2,68
Densidad aparente	1,54	1,52	1,75
Absorción (%)	0,7	0,9	1,7



OBRA EJEMPLO C

Especificación Hormigón:		Tipo Holm. C	
Clase R_{ed} (Mpa)	FD (%)	f_m (mm) Pono (cm)	
H 25	10	40	9
MATERIALES:			
Activo	IA	% aire	4
Cemento	CC	Marca	
Grado:	CC	Clase	Portluziánico
K=	240	Marca	
Peso. Esp. γ_c	3	Artidos	Nº
		G	M
		F1	F2
Procedencia:		Combinado en peso	
Fecha ensayo:		en peso	
Tipo:	R	R	

Granulometría (% Pasa en peso)	%	%	%	%	%
Malas	Escala	L. Pord.			
t (m m)	$t_{\alpha 0.2}$	l			

75	2,371	0,038	100	100	100	100	100
50	2,187	0,038	100	100	100	100	100
40	2,091	0,054	100	100	100	100	100
25	1,904	0,087	100	100	100	83	83
20	1,821	0,119	14	100	100	72	72
12,5	1,657	0,152	1	70	100	61	61
10	1,585	0,189	0	36	100	52	52
5,0	1,380	0,246	0	2	78	34	34
2,5	1,201	0,340	0	1	60	25	25
1,250	1,046	0,496	0	0	45	20	20
0,630	0,912	0,664	0	0	29	13	13
0,315	0,794	0,730	0	0	12	5	5
0,160	0,693	0,774	0	0	4	18	18
0,0085	0,365	0,955	0	0	4	18	18

Densidad real ándos	2,72	2,71	2,68		2,70
Dens. aparente c. s	1,54	1,52	1,75		1,63
Absorción ándos (%)	0,7	0,9	1,7		1,18
Módulo de finura	7,96	6,61	3,72		5,76
Prop. ándos en peso (%)	32,4	24,1	43,4		100

Dosificación (Kg / m ³):					
W	C	G	M	F1	F2
155	433	589	438	788	0
					Densidad
					2412

Condiciones obra		t =	1,282
Coef. Estad.	Des. estándar	s (Mpa)	5
Coef. Variación	CV (%)		15,9185
Resistencia Media Dosificación (Mpa)		31	

Proporciones de mezcla en volumen absoluto		Calculado	F1	F2	C
g	m	0,309	0,171	0,343	0,000
g	m	0,265	0,198	0,360	0,000
					0,177
					1,00

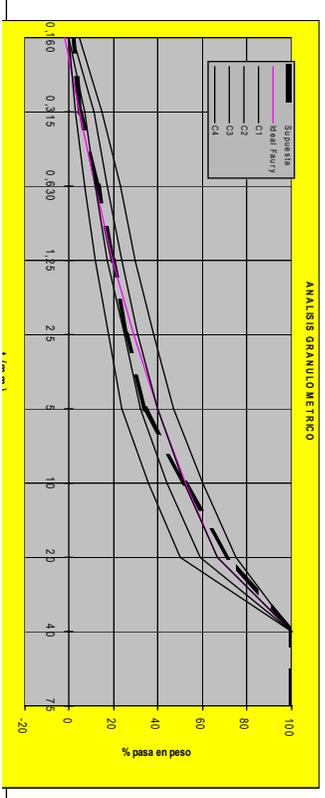
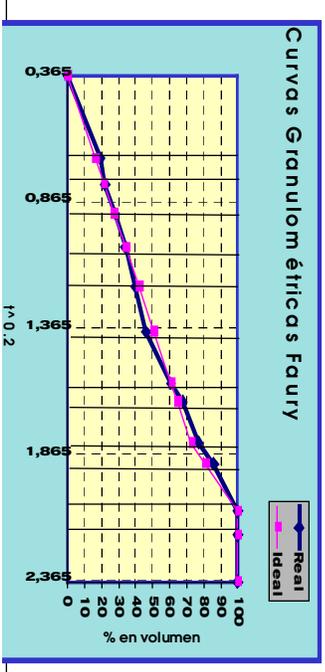
27	20	36	0	18	100	100
27	20	36	0	18	100	100
27	20	36	0	18	100	100
12	20	36	0	18	86	86
4	20	36	0	18	77	77
0	14	36	0	18	68	68
0	7	36	0	18	61	61
0	0	28	0	18	45	45
0	0	22	0	18	37	37
0	0	16	0	18	34	34
0	0	10	0	18	28	28
0	0	4	0	18	22	22
0	0	1	0	18	17	17
0	0	0	0	18	15	15
0	0	0	0	18	11	11

Índices Ponderales			
Estimación de s_w	K	A	h
0,37	0,0	184	165
Estimación de z_w			
Faury	NCH170	Máx	Sup.
0,553	0,474	0,55	0,474

Coef. de Faury		Supuesto	Recomendados
K =	0,365	0,365	0,365
K =	0,002	0,002	0,002
M =	31	31	31

Curvas Faury		Retenidos		Calculos	
Real	Ideal	-G	-M	-F1	-F2
					Ret.
					1

100	100	0	0	0	0	0
100	100	0	0	0	0	0,000
100	100	0	0	0	0	18,904
86	81	53	0	0	0	8,372
77	73	33	0	0	0	8,162
68	65	13	30	0	0	3,615
61	61	1	34	0	0	10,252
45	47	0	34	22	0	8,925
37	34	0	1	15	0	7,770
28	27	0	0	16	0	6,691
22	21	0	0	17	0	5,898
17	15	0	0	8	0	5,025
11	11	0	0	4	0	16,386
0	0	100	100	0	0	100





• **METODO DE VALETTE**

El Método de Valette, desarrollado por el ingeniero francés Valette, emplea técnicas experimentales para obtener las dosis de los materiales componentes que permitan obtener las condiciones previstas para el hormigón. Por este hecho su aplicación requiere de técnicas de laboratorio, las que pueden resumirse en las etapas que se indican a continuación:

⇒ **Determinación de las características físicas de los materiales**

✓ **Pesos específicos cemento y áridos**

✓ **Densidades aparentes áridos**

✓ **Agua de mojado cemento y áridos**

⇒ **Mortero lleno con mínimo contenido de cemento**

⇒ **Hormigón de dosis mínima de cemento**

⇒ **Corrección de la dosis de cemento**



➤ *Determinación de las características físicas de los materiales componentes.*

Las características a determinar son las siguientes:

- Pesos específicos del cemento y los áridos.

Su determinación debe efectuarse en conformidad con la Normas respectivas.

- Densidades aparentes de los áridos.

Debe determinarse en conformidad con las Normas respectivas, considerando los áridos en estado seco y suelto.

- Agua de mojado del cemento y los áridos.

El agua de mojado del cemento corresponde a su agua de consistencia normal.

Para la arena en cambio debe establecerse de manera tal que la cantidad de agua añadida le confiera la consistencia necesaria como para permitirle formar una bola con la mano.

Para el árido grueso, el agua de mojado corresponde a aquella que hace aparecer brillante la superficie de los granos que lo constituyen.

➤ *Determinación del mortero lleno, de mínimo contenido de cemento.*

Su determinación se basa en la idea que los huecos de la arena con su agua de mojado deben quedar exactamente llenos, con un 10% de exceso, por la pasta de cemento con su agua de consistencia normal.

Calculadas las cantidades que producen esta condición, debe prepararse el mortero con dichas cantidades. Este debe presentar un aspecto superficialmente brillante, sin exudación de agua y debe, además, ser plástico, deformándose elásticamente a la presión de un dedo. En caso de no cumplirse estas condiciones, debe corregirse el agua de mojado y repetir el proceso hasta obtenerla.



➤ *Determinación del hormigón lleno, de mínima dosis de cemento.*

Al mortero, preparado según el párrafo anterior, se le adiciona el máximo posible de árido grueso con su agua de mojado correspondiente. Esta adición se efectúa con el hormigón colocado y compactado en un molde que reproduzca lo más exactamente posible las condiciones de obra, apreciándose si la docilidad obtenida es adecuada y la colocación fácil.

Si estas condiciones no se obtienen, debe variarse el agua de mojado del árido grueso según sea el resultado obtenido y repetir el proceso.

➤ *Determinación de la dosificación final.*

De acuerdo a los pesos de materiales usados y el volumen obtenido según las etapas anteriormente descritas, puede calcularse la dosificación obtenida. Si ella no conduce a la dosis de cemento prevista, deberá efectuarse la corrección intercambiando iguales volúmenes reales de arena y cemento con sus respectivas aguas de mojado hasta conseguirla.

➤ *Comentarios al Método de Valette.*

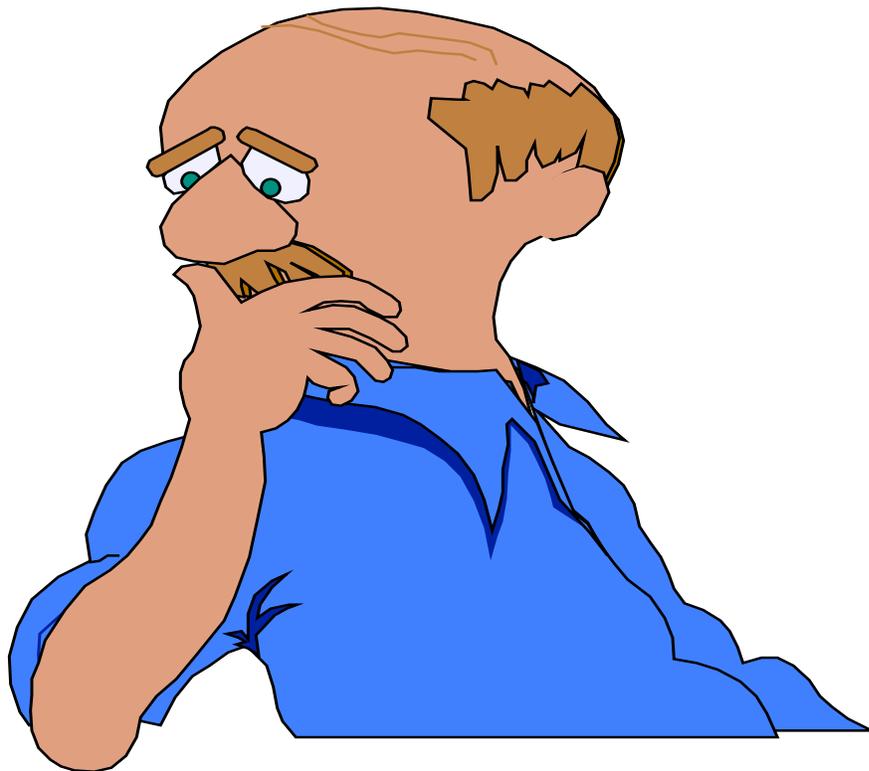
El Método de Valette es eminentemente experimental para la determinación de la dosificación, hecho en el cual reside su principal mérito, puesto que se trabaja directamente con el hormigón que se va a utilizar en obra.

Sin embargo, este mérito constituye también su principal debilidad, puesto que el resultado obtenido es subjetivo, quedando condicionado al criterio del operador, el cual no coincide normalmente con el usuario del hormigón en estudio.

Es discutible, además, el concepto básico que define la condición de mortero y hormigón lleno, puesto que en la realidad la confección de un hormigón es más bien un proceso de mezcla de granos que uno de relleno de huecos de un material grueso por otro más fino.



CORRECCIONES DE DOSIFICACION





● CORRECCIONES POR HUMEDAD

La dosificación de hormigones considera áridos en estado saturado con superficie seca (sss). Por cuanto en obra los áridos se encuentren normalmente con cierto grado de humedad distinto, hay que corregir la dosificación original para no alterar los valores calculados inicialmente.

➤ *Dosificación medida en peso*

Un cierto peso de árido húmedo o mojado está compuesto por el árido como tal más el agua que contiene. En la humedad total están comprendidas la absorción y la humedad libre superficial. Esta última es la que aporta agua a la dosificación.

Para corregir esta situación se debe:

- 1. Determinar la humedad total y absorción del árido.***
- 2. Corregir la dosificación sss considerando el árido seco.***
- 3. Corregir la dosificación seca considerando la humedad total del árido.***

NOTA: La dosificación debe llevarse a árido seco ya que los valores de humedad y absorción obtenidos en laboratorio están referidos al peso seco del árido.

Sin embargo, existe la costumbre en obra de considerar como aproximación o simplificación que la humedad libre (diferencia entre la humedad total y la absorción), estuviera referida al peso sss con lo cual se evita pasar por la dosificación seca.



✓ **Determinar la humedad total y absorción del árido.**

Este paso se realiza en un laboratorio. La humedad libre viene dada por:

$$H_l = H_t - A$$

✓ **Corregir la dosificación sss considerando el árido seco.**

Se determina mediante el valor de la absorción la cantidad de agua contenida en los áridos la cual se suma a la dosis de agua y se resta de los áridos.

El agua de absorción se calcula como:

$$W_{abs} = \frac{P_{sss} * A}{(A + 1)} = P_s * A$$

Alternativamente se puede calcular directamente el peso seco áridos por:

$$P_s = \frac{P_{sss}}{(A + 1)}$$

✓ **Corregir la dosificación seca considerando la humedad total del árido.**

Se determina la humedad total existente en los áridos y que no es necesaria aportar con la dosis de agua. Este valor se resta de la dosis de agua y se suma a los áridos.

El agua de humedad total se calcula como:

$$W_{total} = P_s * H_t$$

Alternativamente se puede calcular directamente el peso seco áridos por:

$$P_h = \frac{P_{sss} * (H_t + 1)}{(A + 1)} = P_s * (H_t + 1)$$

Cuando se asume que la humedad libre está referida al peso sss del árido, se calcula inmediatamente el agua libre la cual se resta de la dosis de agua y se suma a los áridos.



✓ **Ejemplo.**

Propiedades áridos:

Arido	Humedad Total (%) $H_t = (P_h - P_s)/P_s$	Absorción (%) $A = (P_{sss} - P_s)/P_s$	Humedad libre (%) $H_l = H_t - A$
Grava A	1,8	0,6	1,2
Arena B	5,8	1,1	4,7

Dosificación:

Materiales	Dosificación áridos sss (kg/m ³)	Corrección (kg/m ³) $= \frac{P_{sss}A}{(A+1)}$	Dosificación áridos secos (kg/m ³)	Corrección (kg/m ³) $= H_t * P_s$	Dosificación áridos húmedos (kg/m ³)
Cemento	330	-	330	-	330
Agua amasado	174		189	-49	125
Agua absorción áridos	-	+15	-	-15	-
Grava A	1.157	- 7	1.150	+21	1.171
Arena B	743	- 8	735	+43	778
Peso hormigón	2.404	0	2.404	0	2.404



➤ *Dosificación medida en volumen*

Hay que determinar en obra el esponjamiento de la arena:

$$E = \frac{(V_h - V_s)}{V_s}$$

En la dosificación sólo se corrige la arena, agregando un volumen igual al valor del esponjamiento.

El agua de amasado se corrige tal como en las mediciones en peso.

El volumen a medir de arena se calcula como:

$$V_E = (1 + E) * V$$

✓ **Ejemplo.**

Suponiendo que se debe agregar 431 litros de arena seca y que ésta tiene 26% de esponjamiento, la corrección será:

$$431 * 26 / 100 = 112 \text{ litros}$$

La dosificación corregida es:

Materiales	Dosificación áridos secos (kg/m ³)	Densidad aparente	Dosificación áridos secos por m ³	Corrección	Dosificación áridos húmedos por m ³
Cemento	330		330 kg.	-	330 kg.
Agua	189		189 l.	- 64 l.	125 l.
Grava A	1.150	1,575	730 l.	-	730 l.
Arena B	735	1,705	431 l.	+112 l.	543 l.



• CORRECCION POR RENDIMIENTO

Es necesario *comprobar en terreno si se está fabricando el volumen de hormigón que se ha determinado teóricamente*. La dosificación fue calculada para obtener 1 m³ de hormigón después de mezclar los componentes y compactar adecuadamente el hormigón.

Si este objetivo no se logra, es necesario determinar la dosis real de cemento utilizada en la amasada. Se consideran aceptables variaciones de la dosis de cemento de $\pm 3\%$.

✓ **Cuando existan diferencias se pueden dar los dos pasos siguientes:**

1. Calcular la dosificación real utilizada.

Como la densidad medida es la real, se determina un factor por el cual se multiplican todas las dosis determinadas teóricamente de modo que la suma de las nuevas dosis calculadas sea igual a la real. Este factor es igual al cociente entre la densidad teórica del hormigón y la densidad medida.

$$\text{Factor de corrección} = \frac{\text{Densidad teórica}}{\text{Densidad medida}}$$

2. Proponer una dosificación corregida.

Si la dosis de agua y la razón W/C determinadas en la dosificación teórica son adecuadas para satisfacer los requerimientos constructivos y de diseño, lo lógico sería mantenerlas y compensar la diferencia de densidad (teórica y medida) exclusivamente con los áridos de acuerdo a las proporciones determinadas en la dosificación teórica.

✓ **Para comprobar el rendimiento existen dos métodos:**

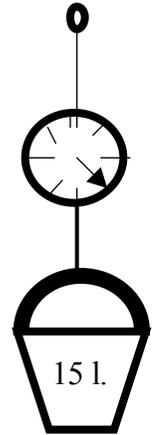
1. **Método de la densidad aparente real:** método preferido por la Norma NCh 1564.

2. **Método práctico:** mediante medición en un cajón de volumen conocido.



➤ **Método de la densidad aparente real**

Se procede a determinar la densidad aparente real del hormigón usando para ello un recipiente de volumen conocido y no menor a 15 litros, el cual se llena, compacta y pesa según procedimiento normalizado.



La densidad aparente medida d_a es: $d_a = \frac{m}{v}$

en que:

m = masa de hormigón (masa pesada – masa recipiente)

v = volumen recipiente

El rendimiento relativo de la amasada se calcula como:

$$R_r = \frac{d_t}{d_a} \times 100(\%) \quad \text{o} \quad R_r = \frac{V_a}{V_t} \times 100(\%)$$

en que d_t y V_t son la densidad y volumen teórico de la amasada en uso

Si $R_r < 100\%$ \Rightarrow Dosis de cemento en uso es superior a teórica

Ejemplo:

Materiales	Dosificación (kg/m ³)		
	Teórica	Real	Corregida
Cemento	350	352	350
Agua	180	181	180
Aridos	1890	1904	1907
Densidad (kg/m ³)	2420	2437	2437



➤ Método práctico

En forma práctica se define rendimiento como la cantidad de litros de hormigón que se pueden fabricar con un saco de cemento.

Se calcula dividiendo el peso neto de un saco de cemento (42,5 kg.) por la dosificación de cemento en kg/m^3 especificada y multiplicada por 1.000 l.

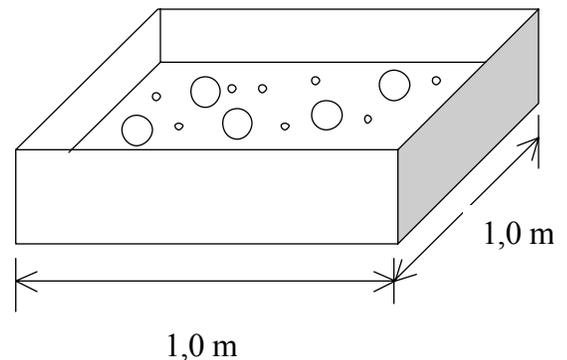
$$r_t = \frac{42,5}{C} \times 1.000 \quad \text{l/saco}$$

Por ejemplo, si la dosis de cemento de una dosificación es 300kg/m^3 , por cada saco de cemento deberá producir el siguiente volumen de hormigón:

$$r_t = 42,5 \times 1000 / 300 = 141,7 \text{ l/saco}$$

Este volumen teórico de hormigón debe compararse con el que se obtiene en terreno mediante amasadas de prueba.

Para la medición del volumen se sugiere preparar un cajón de 1 x 1 m de base y altura suficiente para contener a lo menos dos amasadas. Las masadas sucesivas se vacían al cajón, apisonando el hormigón y emparejando la superficie. La altura media se determina como el promedio de medidas hechas en los cuatro lados del cajón.



Siguiendo el mismo ejemplo anterior, si la altura media determinada en el cajón es de 28 cm. para dos amasadas, el volumen de hormigón será:

290 l. para 2 sacos de cemento o 145 l. para 1 saco de cemento

Rendimiento por saco de cemento:
$$\frac{r_t}{r_a} = \frac{V_t}{V_a} \times 100\%$$

Para el ejemplo: $r_t/r_a = 141,7 \times 100 / 145 = 97,7\%$; se acepta.

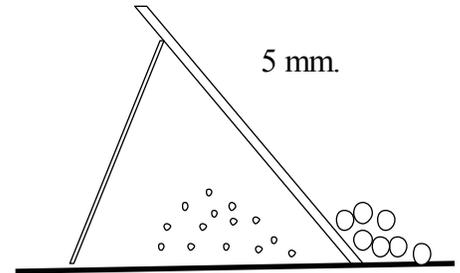


Valores de rendimiento menores que 100% indican que se está usando una dosis de cemento inferior a la especificada y viceversa.



• CORRECCION POR VARIACIONES DE LA GRANULOMETRIA

Frecuentemente en nuestro país se suministra arena que contiene ciertas proporciones de grava, que en algunos casos alcanza a cantidades superiores al 20% del total. Si no se modifica la proporción arena:grava, se estará agregando mayores cantidades de grava y menores de arena, lo que seguramente conducirá a hormigones de baja trabajabilidad y de difícil compactación.



Si las dosificaciones han sido determinada por laboratorios especializados conociendo las características de los áridos que se emplearán, con toda seguridad en ellas están implícitas las correcciones por grava contenida en la arena y se ha considerado el cumplimiento de la banda granulométrica para el árido total.

El procedimiento práctico para corregir esta deficiencia es:

1. Secar hasta masa constante, a 100°C en estufa o anafre, una cantidad de arena mayor que 1 kg. registrándose su peso seco (m_a).
2. La muestra de arena se tamiza en un harnero o malla de 5 mm de abertura, registrándose las masas del material retenido (g) y del que pasa dicha malla (a). Se debe cumplir que: $m_a = g + a$
3. El porcentaje real de grava contenida en la arena es: $\% g_r = (g / m_a) \cdot 100$
y $\% a_r = (a / m_a) \cdot 100$
4. Este porcentaje debe compararse con el determinado o previsto en la dosificación inicial ($\%g_{rd}$)
5. En caso de diferencias, será necesario establecer las correcciones. Si el porcentaje real de grava es superior al previsto inicialmente, se deberá aumentar proporcionalmente la arena, disminuyendo la grava en la misma cantidad. Recíprocamente, si el porcentaje de grava es inferior al previsto, habrá que disminuir la arena compensando con igual cantidad de grava. Las dosis finales están dadas por las ecuaciones:

$$A = A_{\text{dosificada}} \cdot \frac{(100 - \%g_{rd})}{(100 - \%g_r)} = A_{\text{dosificada}} \cdot \frac{\%a_{rd}}{\%a_r}$$

$$G = G_{\text{dosificada}} - (A - A_{\text{dosificada}})$$



• FORMULARIOS CORRECCION DOSIFICACION

Dosificación áridos sss	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava
	[kg]	[kg o l]	[kg]	[kg]	
Por m ³ (áridos sss)	_____	_____	_____	_____	_____
Para _____ m ³	_____	_____	_____	_____	_____

DOSIFICACION ARIDOS SECOS

Corrección a áridos secos $W_{abs} = P_{sss} \times A / (1 + A)$ $P_s = P_{sss} / (1 + A)$

	Arena	Gravilla	Grava		
	[kg]	[kg]	[kg]		
Absorción	_____	_____	_____	=	
Aporte de Agua	_____	+	_____	+	
Dosificación Seca	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava
	[kg]	[kg o l]	[kg]	[kg]	[kg]
Por m ³ (áridos secos)	_____	_____	_____	_____	_____
Para _____ m ³	_____	_____	_____	_____	_____

DOSIFICACION ARIDOS HUMEDOS

Corrección por humedad de los áridos $W_{total} = P_s \times H_t$ $P_h = P_s \times (H_t + 1)$

	Arena	Gravilla	Grava		
	[kg]	[kg]	[kg]		
Humedad	_____	_____	_____	=	
Agua absorbida	_____	+	_____	+	
Dosificación Húmeda	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava
	[kg]	[kg o l]	[kg]	[kg]	[kg]
Por m ³ (áridos húm)	_____	_____	_____	_____	_____
Para _____ m ³	_____	_____	_____	_____	_____

CORRECCION POR DENSIDAD

Densidad Teórica = _____
 Densidad Medida = _____
 Por factor = _____ / _____ = _____

Dosificación	Cemento	Agua	Arena	Gravilla	Grava
	[kg]	[kg o l]	[kg]	[kg]	
Por m ³	_____	_____	_____	_____	_____
Para _____ m ³	_____	_____	_____	_____	_____



VERIFICACION DOSIFICACION CON HORMIGONES DE PRUEBA

Normalmente las dosificaciones se deben verificar en laboratorio o en obra antes de ser aplicadas. Para ello se preparan mezclas de prueba con los mismos materiales y en condiciones similares a las que se tendrán en la faena, lo que permitirá determinar el rendimiento del hormigón, observar su aspecto, y ajustar el agua de amasado necesaria para lograr el asentamiento requerido.

Si el rendimiento difiere en cantidades superiores al 3% de lo calculado, deberán corregirse los áridos proporcionalmente.

Cuando el aspecto muestre un exceso de áridos gruesos se recomienda disminuir la grava en un 2%.

Si hay exceso de árido fino se debe hacer la corrección en el sentido contrario. Es necesario verificar su efecto en otras mezclas de prueba.

Con este hormigón se preparan probetas para comprobar el cumplimiento de las resistencias exigidas. Es conveniente preparar suficiente número de probetas para determinar la curva de endurecimiento ensayando a distintas edades también es recomendable preparar otras series de mezclas de prueba variando la dosis de cemento, por ejemplo en $\pm 10\%$ de la calculada, para tomar una mejor decisión.

Si se emplean aditivos, las mezclas de prueba permiten ajustar la dosis óptima para obtener los beneficios que se persiguen, medir aire incorporado, comprobar reducciones de agua, determinar plazos de duración de efectos, etc.

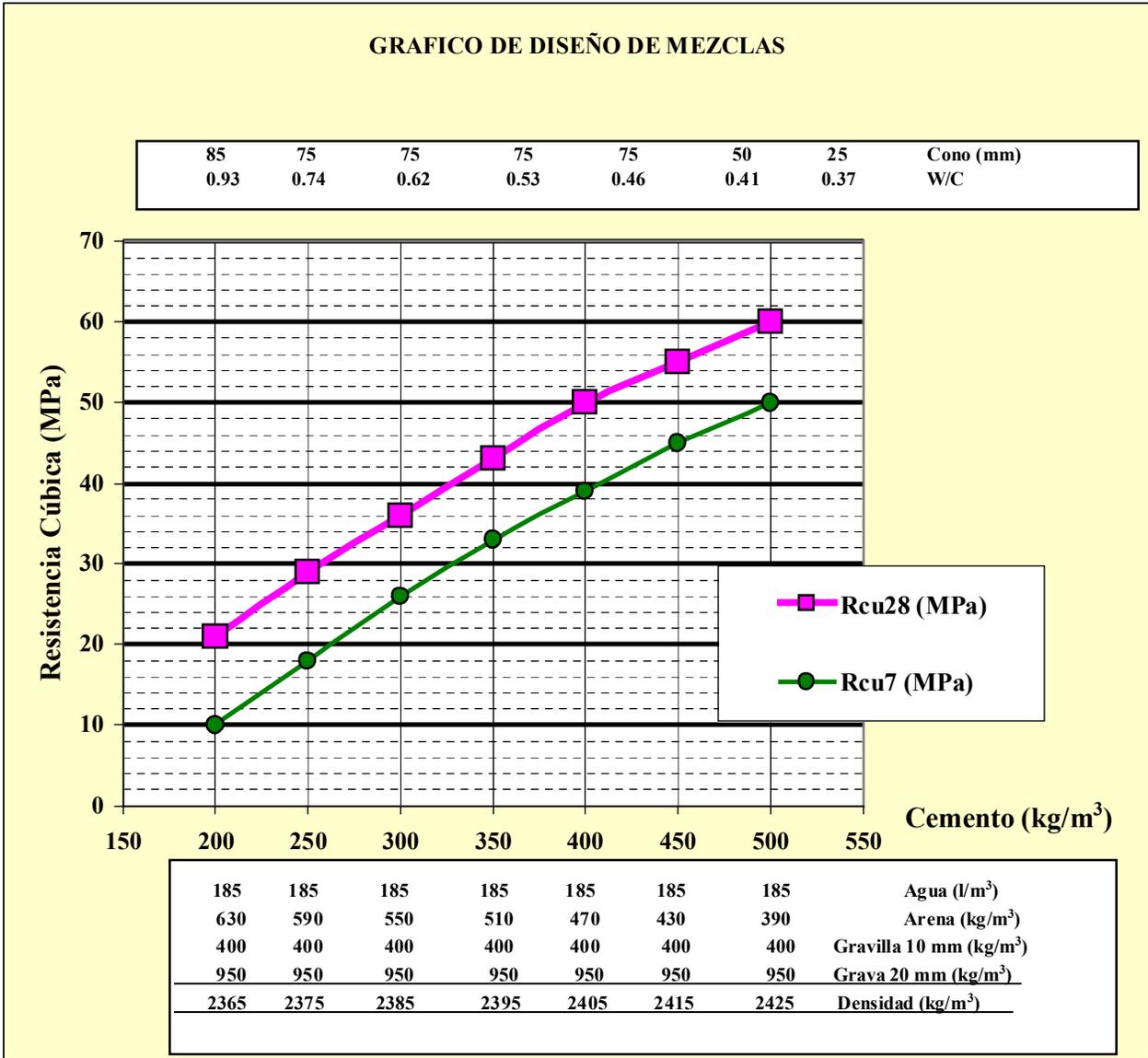


Fig. 27: Ejemplo Gráfico Diseño Mezclas Hormigones Premezclados



➤ Para Cambiar Asentamiento de Cono

Tabla 43: Variación en litros de la dosis de agua, para un metro cúbico de hormigón, requerido para modificar el asentamiento de cono.

		PARA CAMBIAR CONO (cm) DE =>																													
		0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13	13,5	14	14,5	15
PARA CAMBIAR CONO A	0,5	0	-10	-16	-20	-23	-26	-29	-30	-32	-33	-35	-36	-37	-38	-39	-40	-41	-42	-42	-43	-44	-45	-45	-46	-46	-47	-48	-48	-49	-49
	1	10	0	-6	-10	-13	-16	-18	-20	-22	-23	-25	-28	-27	-28	-29	-30	-31	-32	-32	-33	-34	-35	-35	-36	-36	-37	-38	-38	-39	-39
	1,5	16	6	0	-4	-5	-10	-12	-14	-16	-18	-19	-20	-21	-22	-23	-24	-25	-26	-27	-28	-28	-29	-29	-30	-31	-31	-32	-32	-33	-33
	2	20	10	4	0	-3	-5	-8	-10	-12	-13	-15	-16	-17	-18	-19	-20	-21	-22	-23	-23	-24	-25	-25	-26	-26	-27	-28	-28	-29	-29
	2,5	23	13	8	3	0	-2	-5	-7	-9	-10	-11	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-19	-20	-21	-21	-22	-23	-23	-24	-24	-25	-25	-26
	3	26	16	10	5	2	0	-3	-5	-7	-8	-10	-11	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-18	-19	-20	-20	-21	-22	-22	-23	-23	-24	-24
	3,5	28	18	12	8	5	3	0	-2	-4	-5	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-14	-15	-15	-16	-17	-17	-18	-18	-19	-20	-20	-21	-21
	4	30	20	14	10	7	5	2	0	-2	-3	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-13	-13	-14	-15	-15	-16	-16	-17	-18	-18	-19	-19
	4,5	32	22	16	12	9	7	4	2	0	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11	-12	-12	-13	-13	-14	-15	-15	-16	-16	-17	-17
	5	33	23	18	13	10	8	5	3	2	0	-1	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-9	-10	-11	-11	-12	-13	-13	-14	-14	-15	-15	-16
	5,5	35	25	19	15	11	10	7	5	3	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-9	-10	-11	-11	-12	-12	-13	-13	-14	-14
	6	36	26	20	16	13	11	8	6	4	3	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-7	-8	-9	-9	-10	-11	-11	-12	-12	-13	-13
	6,5	37	27	21	17	14	12	9	7	5	4	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-6	-7	-8	-8	-9	-10	-10	-11	-11	-12	-12
	7	38	28	22	18	15	13	10	8	6	5	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4	-5	-5	-6	-7	-7	-8	-9	-9	-10	-10	-11	-11
	7,5	39	29	23	19	16	14	11	9	7	6	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-3	-4	-5	-5	-6	-7	-7	-8	-8	-9	-9	-10
8	40	30	24	20	17	15	12	10	8	7	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-3	-4	-5	-5	-6	-7	-7	-8	-8	-9	-9	
8,5	41	31	25	21	18	16	13	11	9	8	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-2	-3	-4	-4	-5	-5	-6	-7	-7	-8	-8	
9	42	32	26	22	19	17	14	12	10	9	7	6	5	4	3	2	1	0	-1	-2	-2	-3	-3	-4	-5	-5	-6	-6	-7	-7	
9,5	42	32	27	23	19	18	15	13	11	9	8	7	6	5	3	3	2	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-6	-6	-7	
10	43	33	28	23	20	18	15	13	12	10	9	7	6	5	4	3	2	2	1	0	-1	-1	-2	-3	-3	-4	-4	-5	-5	-6	
10,5	44	34	28	24	21	19	16	14	12	11	9	8	7	6	5	4	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-4	-4	-5	-5	
11	45	35	29	25	21	20	17	15	13	11	10	9	8	7	5	5	4	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-4	-4	-5	
11,5	45	35	29	25	22	20	17	15	13	12	11	9	8	7	6	5	4	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	-4	
12	46	36	30	26	23	21	18	16	14	13	11	10	9	8	7	6	5	4	3	3	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	-3	
12,5	46	36	31	26	23	22	18	16	15	13	12	11	10	9	7	6	5	5	4	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	-3	
13	47	37	31	27	24	22	19	17	15	14	12	11	10	9	8	7	6	5	4	4	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	-2	
13,5	48	38	32	28	24	23	20	18	16	14	13	12	11	10	8	8	7	6	5	4	4	3	2	2	1	1	0	-1	-1	-2	
14	48	38	32	28	25	23	20	18	16	15	13	12	11	10	9	8	7	6	6	5	4	4	3	2	2	1	1	0	-1	-1	
14,5	49	39	33	29	25	24	21	19	17	15	14	13	12	11	9	9	8	7	6	5	5	4	3	3	2	2	1	1	0	-1	
15	49	39	33	29	26	24	21	19	17	16	14	13	12	11	10	9	8	7	7	6	5	5	4	3	3	2	2	1	1	0	



➤ *Ajuste de la Dosis de Cemento (razón W/C)*

Si se observa que la dosificación de los hormigones empleados en la faena entrega un hormigón de buena trabajabilidad y resistencia superior a la necesaria.

La dosis de cemento se ajusta, aumentando o disminuyendo los áridos en la misma proporción entre ellos que la dosificación original, con un peso similar a la variación de peso de cemento.

Los ajustes de disminución de cemento se recomienda realizarlos en cantidades de 10 kg por m³ cada vez.

Una vez realizado el ajuste, esperar a tener cinco muestras con ensayo a tres días, y si estas muestras arrojan valores 10% superiores a los mínimos indicados para el promedio y muestras individuales, proceder a una nueva reducción de cemento.

Si los valores para tres días están comprendidos entre 5% y 10% mayores a los valores indicados, esperar 5 resultados a siete días y analizar nuevamente los resultados a tres días, con el número de probetas existentes hasta ese momento.

Con esta información decidir sobre una nueva variación de dosis de cemento

Si los valores obtenidos a tres y siete días son menos de 5% mayores que los valores indicados anteriormente, realizar los ajustes con resultados a 28 días. Estos ajustes con resultados a 28 días se deben realizar en dosis de cemento menores a 10 kg por m³ cada vez.

También se puede utilizar la Fig. 28 (Relación entre la resistencia a la compresión y la razón Agua/Cemento con el método Inglés).

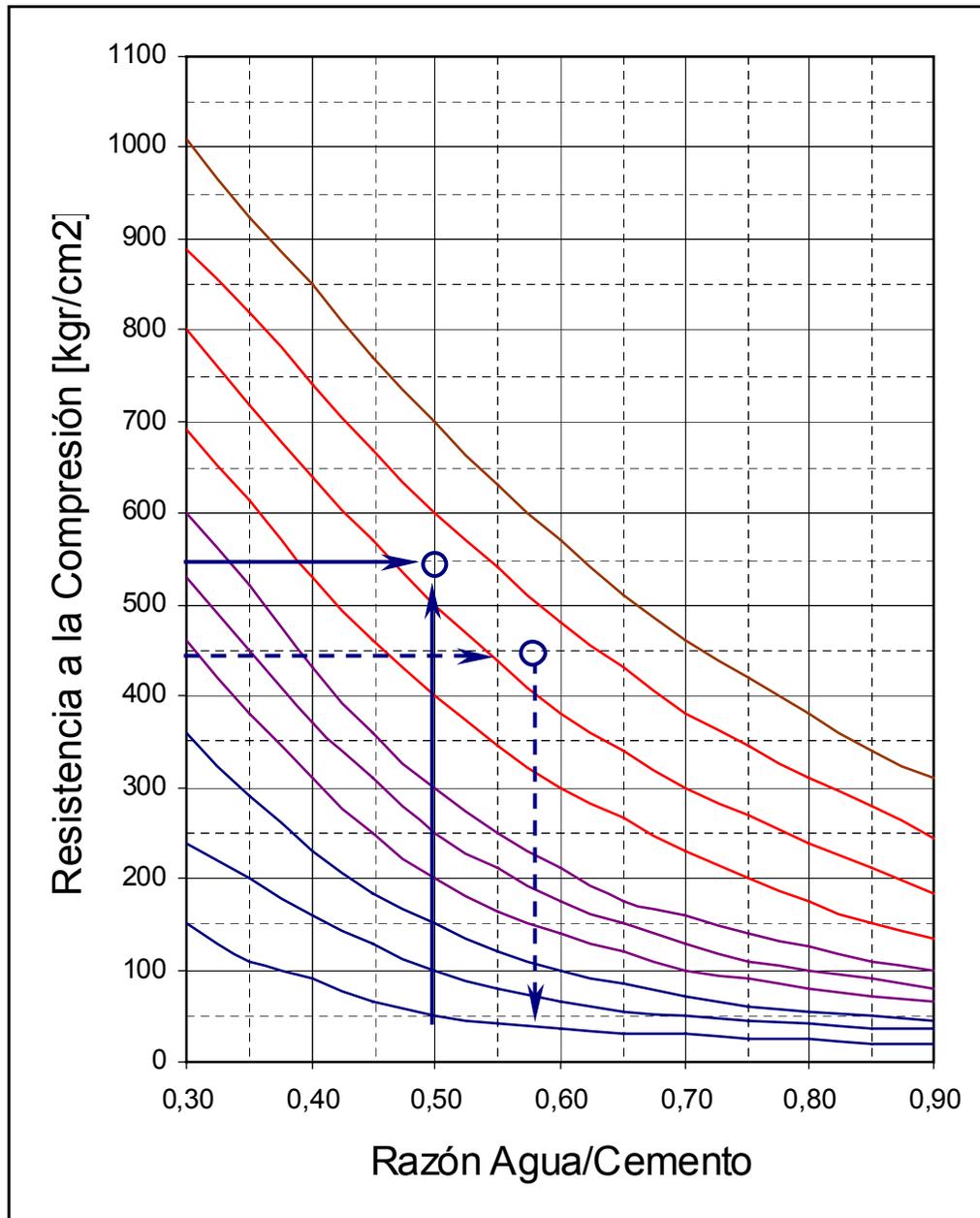


Fig. 28: Relación entre Resistencia a la Compresión y Razón Agua/Cemento



Identificación de hormigón: 1

HORMIGON DE PRUEBA
DOSIFICACION Y CORRECCION

Solicitado por: 1

Fecha confección: Prop. Añidos (%)

Grasa = #DIV/0

Horas confección: Arena Gruesa = #DIV/0 **Nº** **Q0** **Q0**

Gravilla = #DIV/0

Agua (10%) = #DIV/0 **2** **Q0**

Agua (10%) = #DIV/0 **0**

Arena Medía = #DIV/0

Otros = #DIV/0

Tarea	
Tarea: hormigón	
Volumen	
Densidad (kg/m ³)	#DIV/0!

Material	Un.	Tipo	ESTUDIO DE LA DOSIFICACION			HORMIGON DE PRUEBA			Cachodado(L)	Dif.	P. Húmedo	P. Seco	P. s.s.s.	P. s.s.s.	Corregda	Correg. C y W
			P. s.s.s.	Dsss	Vol. Abs.	P. s.s.s.	Abs	P. seco								
Cemento	kg	Retete	2,900	0,000	0	0	0	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	0	
Agua	L		1,000	0,000	0	0	0	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	0	
Gravilla	kg			#DIV/0!	#DIV/0!	0	0	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	
Gravilla	kg			#DIV/0!	#DIV/0!	0	0	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	
Arena Gruesa	kg			#DIV/0!	#DIV/0!	0	0	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	
Arena Medía	kg			#DIV/0!	#DIV/0!	0	0	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	
Otros	kg		1	0,000	#DIV/0!	0	0	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	#DIV/0!	
Aditivo 1	kg		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	#DIV/0!	0,000	
Aditivo 2	kg		0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000	0,000	#DIV/0!	0,000	
Ale	%		0	0,015	0,000	0	0	0,00		0,00	0,00	0,00	0,00	#DIV/0!	0	

Peso específico portlando árido = ##### Vol. Abs = #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0!

W/C = #DIV/0! W/C = #DIV/0! Densidad Técnica = #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0!

W/C = #DIV/0! W/C = #DIV/0! Densidad técnica = #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0! #DIV/0!



EJEMPLO:

PE 2

HORMIGON DE PRUEBA
DOSIFICACION Y CORRECCION

PE 2

Solicitado por INSTITUTO CHILENO DEL CEMENTO Y DEL HORMIGON

Identificación del hormigón H35(10)40-6-CA

Fecha confección 04/Ene/95 Prop. Aridos (%) 30 Proportión aditivos Coma 60 Temp. horn 220
 Hora confección 12:48 Grava = 16 N°coqf. cam 1 39 %aire 0 Temp. Amb 250
 Cemento (10%) = 1.392 Arena Gruesa = 20 Diferencia Coma 12.53
 agua (10%) = 0.636 Arena Meda = 34 Agua 5.57

Tara	8180
Tara Hormigón	32400
Volumen	10016
Densidad (kg/m³)	2418

ESTUDIO DE LA DOSIFICACION										HORMIGON DE PRUEBA				Corregido/Correg. C = de						
Materia	Un.	Tipo	P. s.s.s.	Doss	Vol. Abs.	sss CORR.	P. s.s.s.	Abs	P. seco	Hum	P. Húmedo	Cochocada (L)	Dif.	P. Húmedo	P. Seco	P. s.s.s.	P. s.s.s.	P. s.s.s.	Vol. Abs.	P. s.s.s. CORR.
Cemento	kg	P. dlp. Esp.	348	2.900	0.120	348	348	348	348	348	348	13.92	0.220	13.92	13.92	34.9	34.8	34.8	0.120	348
Agua	L	P. dlp. Esp.	159	1.000	0.159	159	164	188	188	155	155	6.21	0.220	6.43	7.74	1.69	1.69	1.69	0.169	169
Grava	kg	Pegson Ornc	587	2.715	0.216	572	588	0.81	563	0.66	567	22.69		22.69	22.94	22.72	5.70	5.70	0.210	563
Gravilla	kg	Mado Ornc	313	2.723	0.115	305	308	1.02	300	0.94	301	12.04		12.04	12.00	12.12	3.04	3.04	0.112	300
Arena Gruesa	kg	Mado Ornc	391	2.689	0.145	381	378	1.37	373	3.19	385	15.39		15.39	14.92	15.12	3.79	3.80	0.141	375
Arena Meda	kg	Lalura Rod	685	2.685	0.248	648	648	1.87	631	2.55	647	25.89		25.89	25.25	25.72	6.45	6.46	0.240	688
Otros	kg		0		0.000	0	0	0	0	0	0	0.00		0.00	0.00	0	0	0	0.000	0
Aditivo 1	kg	Aditast 21	1.534	1.130	0.001	1.534	1.534	1.534	1.534	1.534	1.534	0.061		0.06	0.061	1.539	1.534	1.534	0.001	1.534
Aditivo 2	kg		0.000	1.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000		0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Aire	%		0		0.015	0.000	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	0	0.015	0
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.019	2413.10	2405.21	2454	2405.21	33.08	2404.91	56.20	0.22	56.42	56.42	241.8	241.8	241.8	1.008	2386.36
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.000	2405.21	2405.21	2405.21	2405.21	33.08	2404.91	40.00	0.22	40.22	40.22	238.711				1.000
Pasos espaciales para los áridos =			2.723	Vd. Abs. =	1.0															



APROBACION DISEÑO HORMIGONES

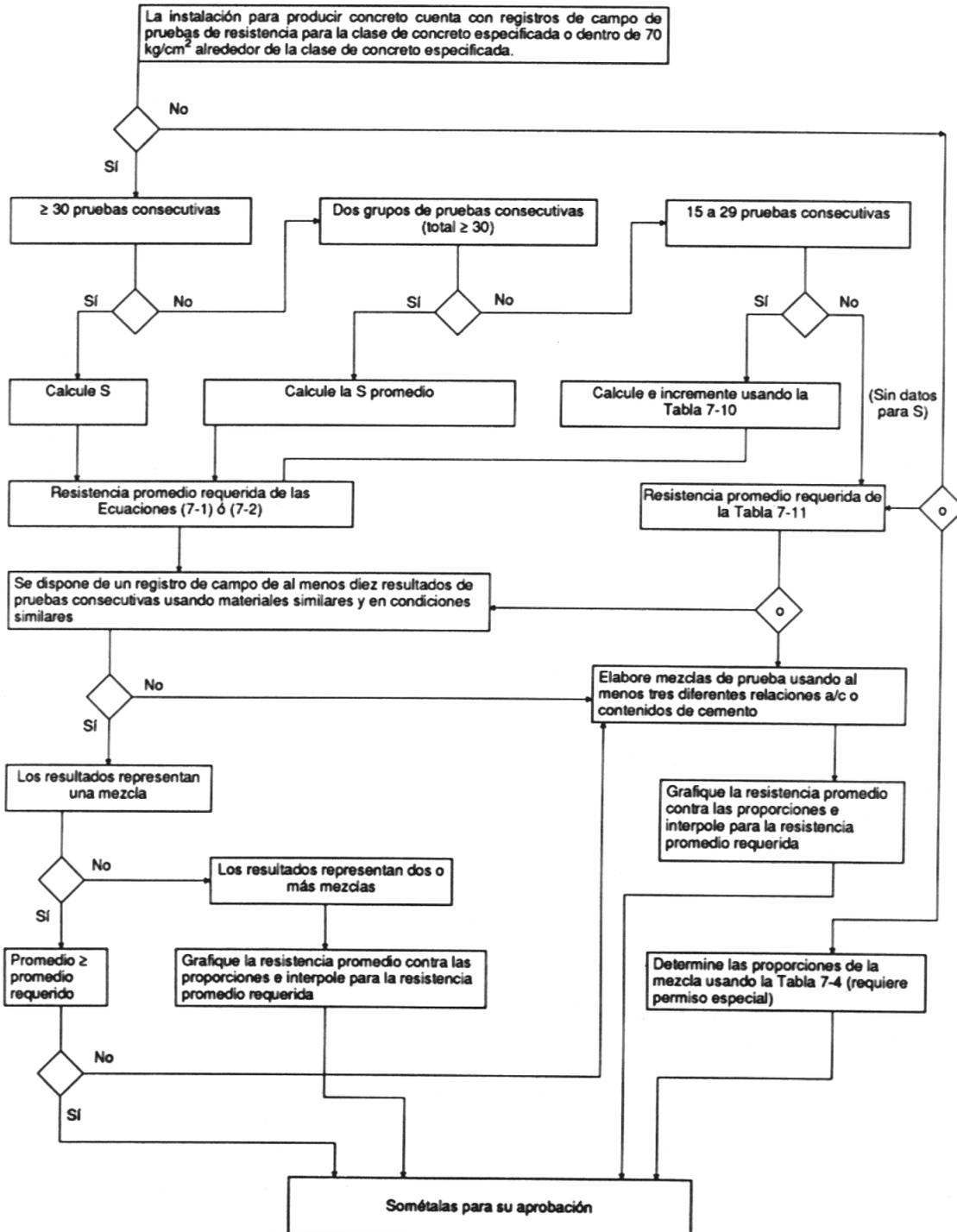


Fig. 29 Diagrama de Flujo ACI para Selección y Documentación Proporciones Hormigón



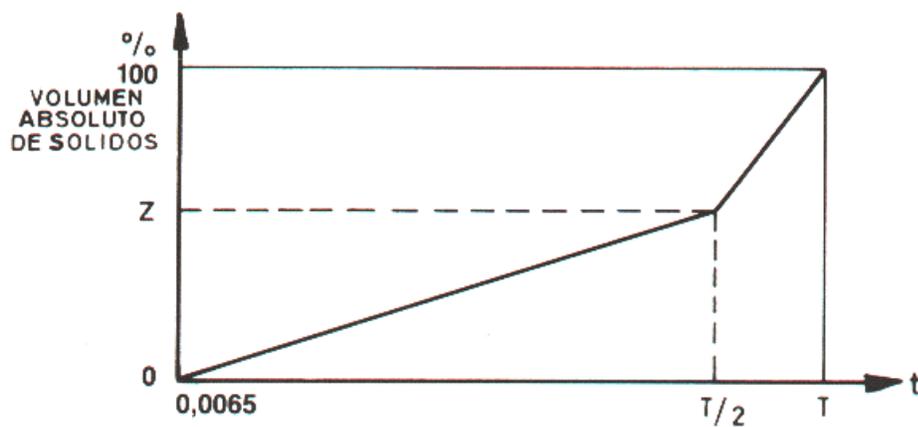


Fig. 21: Curva Granulométrica Ideal de Faury