

LECCIÓN 3

PROPIEDADES DEL HORMIGÓN

(Art. 31 y 39 EHE-08)

1. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO
2. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO
3. DEFORMACIONES TERMOHIGROMÉTRICAS
4. EL HORMIGÓN Y LA TEMPERATURA
5. CARACTERISTICAS MECANICAS DEL HORMIGON
6. CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS DEL HORMIGÓN

1. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN FRESCO

• DOCILIDAD

- Aptitud para ser puesto en obra con los medios de compactación disponibles. El hormigón ha de rodear las armaduras con los recubrimientos exigibles y rellenar los encofrados sin que se produzcan coqueras
- Se valora determinando la **consistencia** mediante el **ensayo de asentamiento**
- Depende: Cantidad agua amasado, T.M.A., granulometría, forma de áridos

Tipo de consistencia	Asiento en Cono de Abrams (cm)
Seca (S)	0 – 2
Plástica (P)	3 – 5
Blanda (B)	6 – 9
Fluida (F)	10 – 15
Líquida (L)	16 – 20

Evitar las consistencias S y P; L sólo mediante superfluidificantes

Consistencias de hormigón recomendables (Calavera, 2009)

		TIPO DE PIEZAS														
		DE DÉBIL DENSIDAD DE ARMADURAS					DE MEDIA DENSIDAD DE ARMADURAS					DE FUERTE DENSIDAD DE ARMADURAS				
		CIMEN- TACIONES	MUROS	PILARES Y PANTA- LLAS	VIGAS	FORJADOS, LOSAS Y ESCA- LERAS	CIMEN- TACIONES	MUROS	PILARES PILAS DE PUENTE Y PANTA- LLAS	VIGAS	FORJADOS, LOSAS Y ESCA- LERAS	CIMEN- TACIONES	MUROS	PILARES PILAS DE PUENTE Y PANTA- LLAS	VIGAS	FORJADOS, LOSAS Y ESCA- LERAS
CONSISTENCIAS RECOMENDABLES (cm)	MÍNIMA	7	7	9	9	7	9	9	11	11	9	10	10	20	15	10
	MÁXIMA	4	4	6	6	4	5	5	7	7	5	6	6	8	8	6
		P/B	P/B	B	B	P/B	B	B	B/F	B/F	B	B	B	F	F	B

- Conclusión: Siempre B (excepto pilares, vigas y pantallas muy armados → F)
- Hormigón autocompactante → Anejo 17

• HOMOGENEIDAD

- Componentes regularmente distribuidos por toda la masa
- Puede perderse por: Exceso de agua; T.M.A. elevado; sacudidas durante el transporte; puesta en obra en caída libre
- Fenómenos: *Segregación* (separación de gruesos y finos) y *Decantación* (en mezclas muy líquidas, gruesos al fondo y mortero en superficie)

2. PROPIEDADES DEL HORMIGÓN ENDURECIDO

• PESO ESPECÍFICO

Depende: Naturaleza de los áridos, granulometría, compactación

H. en masa (**23 kN/m³** si $f_{ck} \leq 50$ MPa; **24 kN/m³** si $f_{ck} > 50$ MPa)

H. armado y pretensado (**25 kN/m³**)

H. ligero (áridos ligeros) (12 - 20 kN/m³) → Anejo 16

• COMPACIDAD

Relacionada con el peso específico

Depende: Compactación, naturaleza de los áridos, granulometría

↑ Compacidad ⇒ ↑ Resistencia mecánica (esfuerzos, impactos, desgaste, vibraciones)

⇒ ↑ Resistencia física (helada) y química (acciones agresivas)

• PERMEABILIDAD

El agua puede penetrar por: - *Presión* (depósitos, conducciones...)

- *Capilaridad* (contacto con medio húmedo)

Red capilar se forma por evaporación del agua de amasado en exceso

Factor principal: A/C ($\text{Perm}_{A/C=0,8} = 30 \times \text{Perm}_{A/C=0,5}$)

• RESISTENCIA AL DESGASTE

- Importante en el interior de construcciones industriales

- Usar: Hormigones secos (lechada superficial es desgastable y productora de polvo)
y arena silícea (> 30 % arena total)

- Tratamientos especiales:

Revestimientos (morteros de cemento con árido fino especial, morteros especiales)

Tratamientos superf. endurecedores (impregnación con fluosilicatos, silicatación...)

3. DEFORMACIONES TERMOHIGROMÉTRICAS

• RETRACCIÓN DEL HORMIGÓN

- Reducción del volumen por evaporación de parte del agua adsorbida (agua adherida a los granos de árido formando meniscos)
- Aunque la retracción incrementa las deformaciones por contracción térmica, su efecto puede despreciarse a edades cortas (5-6 días)

Componentes de la retracción total:

- Retracción autógena (o plástica): Se desarrolla durante el estado plástico
- Retracción de secado (o hidráulica): Se desarrolla cuando la humedad del ambiente < humedad en el interior de los poros (caso habitual)

Factores:

- a) Grado de humedad ambiental
- b) Composición del hormigón:
 - Tipo de cemento (mayor retracción los más resistentes y rápidos)
 - Presencia de finos en el hormigón (mayor retracción cuanto más finos)
 - Cantidad de agua de amasado (mayor retracción cuanto mayor A/C o, para A/C constante, cuanto mayor dosis de cemento)
- c) Espesor o menor dimensión de la pieza (mayor retracción a menor espesor)
- d) Tiempo transcurrido desde la ejecución

Cálculo de la retracción:

Valores medios aproximados:

$$-0,35 \text{ mm/m} = -350 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm} \quad (\text{h. en masa})$$

$$-0,25 \text{ mm/m} = -250 \cdot 10^{-6} \text{ mm/mm} \quad (\text{h. armado}) \quad (\approx 20 \% \text{ menos})$$

Cálculo más afinado → Método de los comentarios del art. 39.7 EHE-08

Tabla 39.7.c
Valores de la retracción [10^{-6}] para $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$

t [días]	Humedad relativa [%]					
	50		70		90	
	Espesor medio [mm]					
	50	600	50	600	50	600
14	-186	-30	-146	-29	-76	-28
30	-332	-46	-258	-43	-126	-37
90	-455	-84	-352	-74	-170	-55
365	-513	-177	-397	-145	-193	-88
1.825	-529	-305	-409	-242	-198	-129
10.000	-532	-369	-412	-289	-199	-149

Espesor medio:

$$e = \frac{2A_c}{u}$$

A_c = área sección

u = perímetro expuesto

Fuente: EHE-08, 2011

• CONTRACCIÓN TÉRMICA INICIAL

- Reacción exotérmica del fraguado del cemento → Aumento de temperatura
- La temperatura en el centro de la pieza alcanza los 40-60 °C a las 25-30 h
- La temperatura de la pieza se iguala a la del ambiente a los 5-6 días
- Consecuencia: Acortamientos importantes

GRÁFICO TÍPICO DE TEMPERATURAS DEL HORMIGÓN Y AMBIENTE

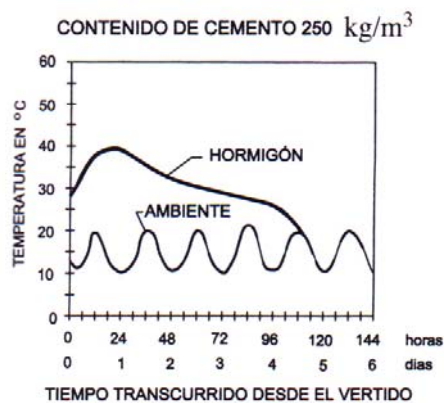
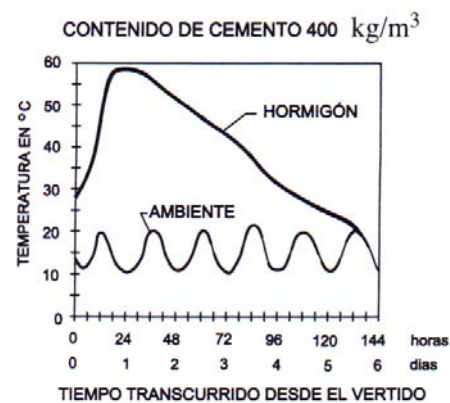


GRÁFICO TÍPICO DE TEMPERATURAS DEL HORMIGÓN Y AMBIENTE



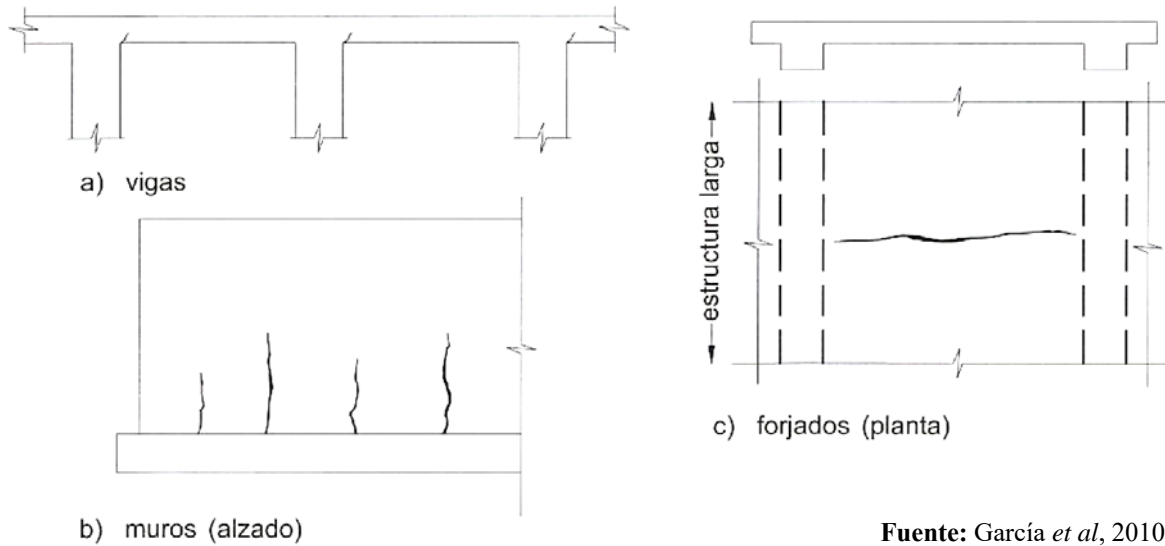
Factores:

Fuente: Calavera, 2009

- Temperatura ambiente
- Tipo y contenido de cemento
- Espesor o menor dimensión de la pieza
- Tipo de encofrado

• EFECTOS DE LAS DEFORMACIONES TERMOHIGROM.

Deformación impuesta \Rightarrow Tracciones en estructuras hiperestáticas \Rightarrow Fisuras



Solución: Juntas de contracción, armadura mínima y curado adecuado; adicionalmente, empleo de cemento LH (de bajo calor de hidratación)

- Duración mínima de apertura de la junta: 3 días en invierno; 4 en verano
- Distancia entre juntas de contracción: 20 m en invierno; 16 m en verano

4. EL HORMIGÓN Y LA TEMPERATURA

• BAJAS TEMPERATURAS

Heladas

Depende de su *porosidad* (cuantía y estructura de los capilares) y *grado de saturación*

Solución: ↑ Compacidad y/o uso de aireantes

• ALTAS TEMPERATURAS

- > 150 °C ⇒ ↓ Resistencia tracción
- > 300 °C ⇒ Nula resistencia tracción y
↓ resistencia compresión
- > 500 °C ⇒ Destrucción cal hidratada
por pérdida H₂O cristalización
- > 900 °C ⇒ Destrucción total hormigón



Fuente: Górriz, 2005

• COEFICIENTE DILATACIÓN TÉRMICA

$$\alpha (\text{hormigón}) = 10^{-5} (0,01 \text{ mm/m/}^{\circ}\text{C}) \cong \alpha (\text{acero}) = 1,2 \cdot 10^{-5}$$

En proyecto:

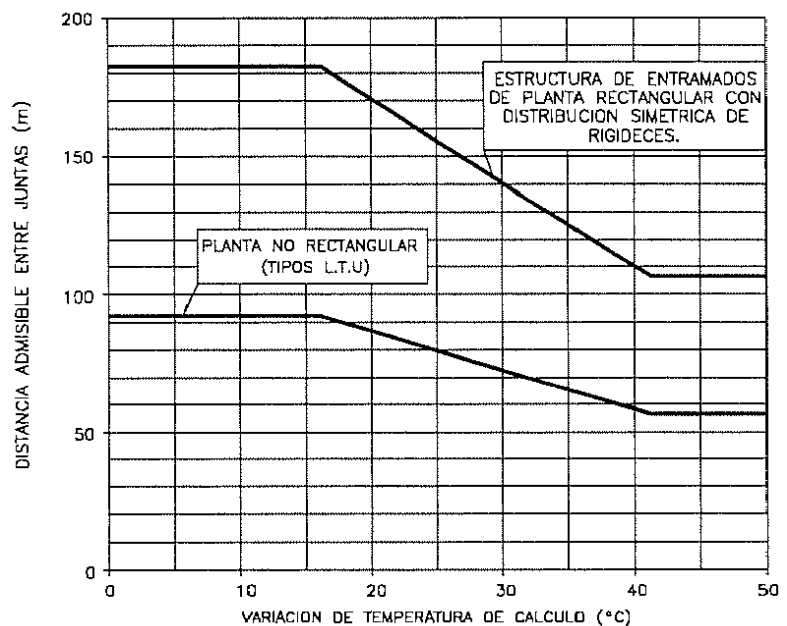
- Estr. Hiperest. → Esfuerzos

- Juntas de dilatación:

40 m s/ CTE

60-90 m s/ Calavera

56-182 m s/ *Nat. Acad.
of Sciences (1974)*



Fuente: Calavera, 2009

Temperaturas - Tiempos

Tiempo t (minutos)	Temperatura alcanzada (°C)			
	En el incendio	En el acero estructural sin protección	En la armadura con un recubrimiento r (mm)	
			$r = 30$	$r = 45$
30	815	815	205	140
60	925	925	370	270
90	990	990	490	350
120	1030	1030	570	425
150	1070	1070	620	490
180	1100	1100	660	510

Pérdidas de resistencia - Temperatura

Temperatura T (°C)	Pérdida de resistencia (%)	
	Acero armadura	Hormigón
20	0	0
400	15	15
500	30	30
600	60	40
700	85	60

Disminución del Módulo de Elasticidad - Temperatura

Temperatura T (°C)	Disminución del Módulo de Elasticidad (%)	
	Acero armadura	Hormigón
20	0	0
400	30	75
500	40	83
600	70	90
700	87	90

Conclusión: A 500 °C \Rightarrow 70 % Resistencias, 60 % E_{acero} , 17 % E_{horm} \Rightarrow

\downarrow Rigidez, \uparrow Deformabilidad \Rightarrow Deformaciones sin esfuerzos importantes

5. CARACTERÍSTICAS MECÁNICAS

• RESISTENCIA A COMPRESIÓN

- Ensayo de rotura a compresión a 28 días sobre probeta cilíndrica de 15×30 cm, fabricada, conservada, refrentada y ensayada según método normalizado

- Art.86.3.2 EHE → Posibilidad de probeta cúbica 15 cm (ó 10 cm $f_{ck} \geq 50$ MPa)

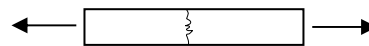
• RESISTENCIA A TRACCIÓN

Importante en: - Fenómenos de fisuración, esfuerzo cortante, adherencia...

- Pavimentos (refleja mejor la calidad y limpieza de los áridos)

Tres tipos de ensayos:

◆ *Tracción directa*



Tracción de probeta de 15×30 mediante garras o con una resina (ejecución difícil)

◆ *Tracción indirecta o ensayo brasileño*

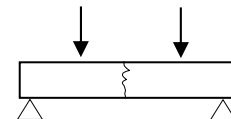
Se carga la probeta a lo largo de 2 generatrices opuestas

$$f_{t,d} = 0,90 f_{t,i}$$



◆ *Flexotracción*

Probeta prismática. Comportamiento tipo viga



En general:

$$f_{t,d} < f_{t,i} < f_{t,f}$$

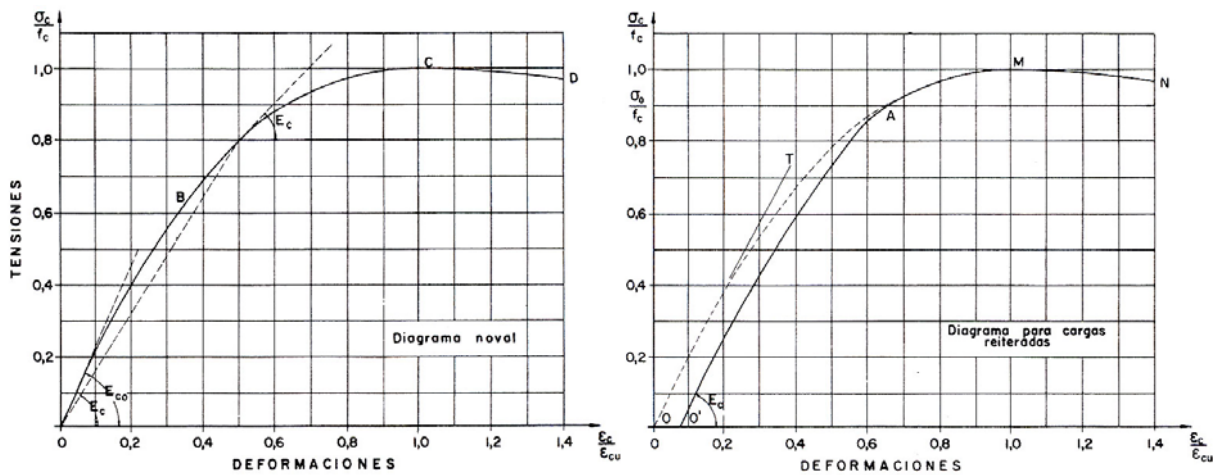
6. CARACTERÍSTICAS REOLÓGICAS

• CLASIFICACIÓN DE LAS DEFORMACIONES

Deformaciones	Dependientes de las cargas exteriores		Independientes de las cargas exteriores
	Instantáneas	Diferidas (Fluencia)	
Reversibles	Elásticas	Elásticas diferidas	Térmicas
Irreversibles	Remanentes	Plásticas diferidas	Retrac. y Contr. térm.

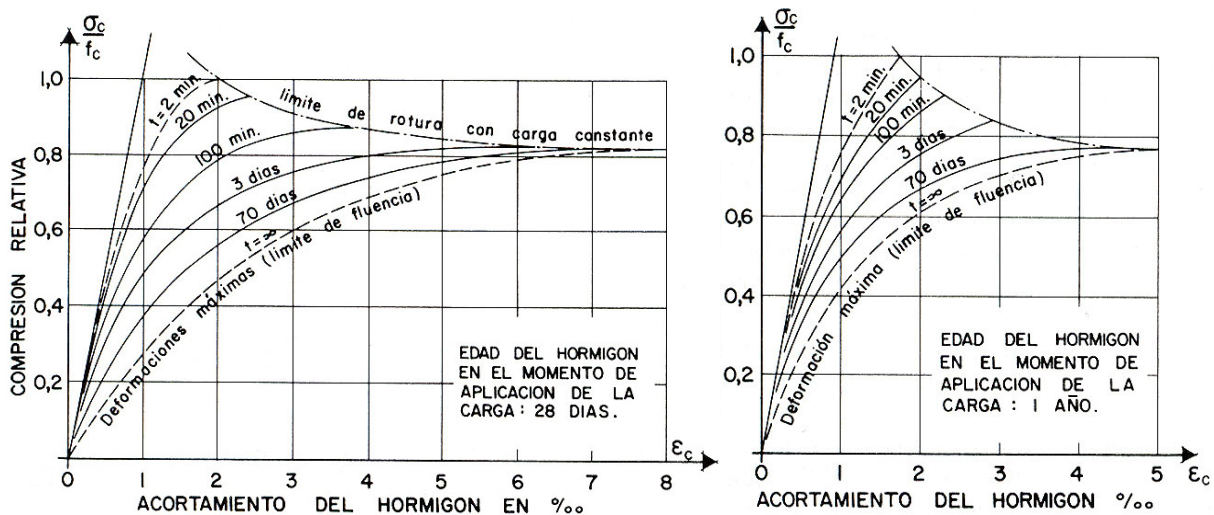
• DIAGRAMAS UNITARIOS TENSION – DEFORMACIÓN

Diagramas σ - ϵ noval y reiterativo:



Fuente: Arroyo *et al*, 2018

Diagramas σ - ϵ para dos hormigones de distinta edad:



Fuente: Arroyo *et al*, 2018

• MÓDULO DE DEFORMACIÓN LONGITUDINAL

- *Módulo tangente* → Inclinación de la tangente a la curva en cada punto
- *Módulo secante* → Inclinación de la recta que une el origen con cada punto
- *Módulo inicial o en el origen* → Inclinación de la tangente en el origen

Conclusiones:

- Del diagrama noval ⇒ Móds. tang. y sec. disminuyen al aumentar la tensión
- Del diagrama reiterativo ⇒ Mód. secante, para tensiones que ya hayan sido alcanzadas anteriormente, es constante $\cong 85\%$ del módulo inicial en 1ª carga

◆ En deformaciones por cargas instantáneas o rápidamente variables:

$$\text{Módulo inicial a 28 días} \rightarrow E_c = \beta_E 8500 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad [\text{N/mm}^2]$$

$$\beta_E = 1,30 - \frac{f_{ck}}{400} \leq 1,175$$

siendo f_{cm} = resistencia media a compresión a 28 días (N/mm^2)

A falta de ensayos puede adoptarse $f_{cm} = f_{ck} + 8$ (N/mm^2)

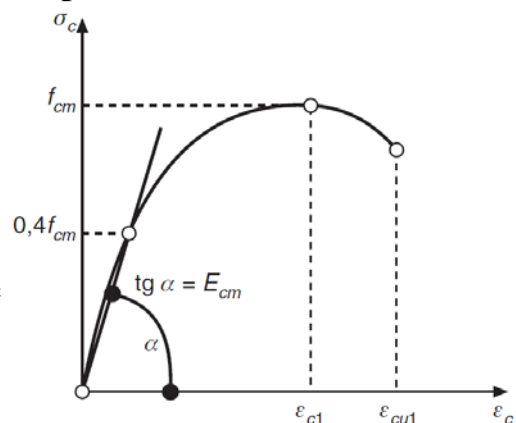
$$\text{Para } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \rightarrow \beta_E = 1,175 \rightarrow E_c = 9987,5 \sqrt[3]{f_{cm}} \quad (\text{N/mm}^2)$$

◆ En análisis elástico, debe utilizarse un valor reducido de E para tener en cuenta la deformación plástica inicial. Se adopta el módulo secante:

Módulo secante a 28 días:

$$E_{cm} = 8500 \sqrt[3]{f_{cm}} = 8500 \sqrt[3]{f_{ck} + 8}$$

Válido para tensiones de servicio $\leq 0,40f_{cm}$



Fuente: EHE-08, 2011

◆ **Correcciones de E (comentarios art. 39.6 EHE-08)**

- Método de evaluación de E a edades distintas a 28 días

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0,3} E_{cm}$$

con $f_{cm}(t)$ resistencia media a compresión a t días (art. 31.3)

- Tabla 39.6 Coeficiente corrector α de E en función de la naturaleza del árido

ÁRIDO		α
Cuarcita		1,0
Arenisca		0,7
Caliza	Normal	0,9
	Densa	1,2
Rocas volcánicas (ofita, basalto, etc.)	Porosa	0,9
	Normal	1,2
Rocas plutónicas (granito, etc.)		1,1
Diabasas		1,3

◆ **Cargas permanentes o duraderas (deformación diferida final):**

Fluencia del hormigón → Reducción de E mediante E/φ

Cálculo coef. φ Art. 39.8 EHE-08

Aproximadamente $\varphi = 1,5$ (clima húmedo)

$\varphi = 2,5$ (clima seco)

Deformación total = Deformación instantánea + Deformación diferida final

● **COEFICIENTE DE POISSON** → 0,20

Tabla 39.8.aValores del coeficiente de fluencia para $f_{ck} = 30 \text{ N/mm}^2$

Edad de puesta en carga t_0 [días]	Humedad relativa [%]					
	50		70		90	
	Espesor medio [mm]					
	50	600	50	600	50	600
1	5,6	3,8	4,3	3,3	3,1	2,7
7	3,9	2,7	3,0	2,3	2,1	1,9
14	3,4	2,3	2,6	2,0	1,9	1,7
28	3,0	2,0	2,3	1,7	1,6	1,5
60	2,6	1,8	2,0	1,5	1,4	1,3
90	2,4	1,6	1,9	1,4	1,3	1,2
365	1,8	1,2	1,4	1,1	1,0	0,9
1.800	1,3	0,9	1,0	0,8	0,7	0,7

Fuente: EHE-08, 2011