2.6 Agentes expansivos

2.6.1. Introducción

El hormigón es, posiblemente, el material de construcción más extendido del mundo, sobre todo desde la aparición del cemento Portland. Por su versatilidad, ha encontrado aplicación en casi todos los tipos de estructuras de edificación y obra civil. Uno de los inconvenientes asociados a este material es su inestabilidad volumétrica, denominada comúnmente retracción. Aunque existen varios tipos (plástica, endógena, térmica, por carbonatación o por secado), la retracción por secado suele ser la de mayor cuantía.

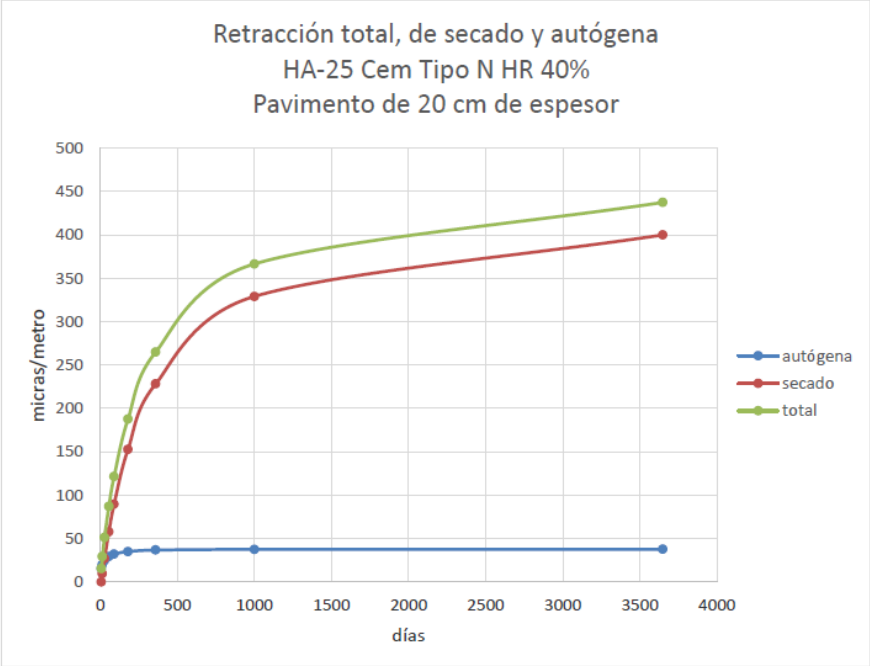


Figura 192. Retracción total Eurocódigo 2 (HA-25, Tipo N, HR40%, Pavimento 20 cm

La retracción por secado es la contracción de volumen de la pasta provocada por una reorganización del agua interna, al disminuir la humedad del hormigón. Está asociada al agua adsorbida -ligada a la superficie del sólido y, por consiguiente, bajo la influencia de fuerzas atractivas-, agua que puede ser eliminada en gran parte por secado de la pasta en condiciones de baja humedad relativa. Si tenemos restricción de movimientos en el hormigón, la contracción generará esfuerzos de tracción en el material que, en caso de superar la habitualmente baja resistencia a tracción del hormigón, provocará la fisuración del elemento.

La retracción por secado del hormigón depende principalmente del contenido de agua, de la naturaleza y tamaño del árido, del ambiente de exposición, de las proporciones de los componentes de la mezcla y del contenido de pasta. A menor contenido en agua, árido con mayor módulo de elasticidad, mayor tamaño del árido, curado en húmedo prolongado y mezclas con menor cuantía de partículas finas, menor será la retracción por secado. La retracción final por secado del hormigón varía típicamente entre el 0,04% y el 0,06% en volumen.

Típico ejemplo de fisuración debida a la retracción por secado del hormigón

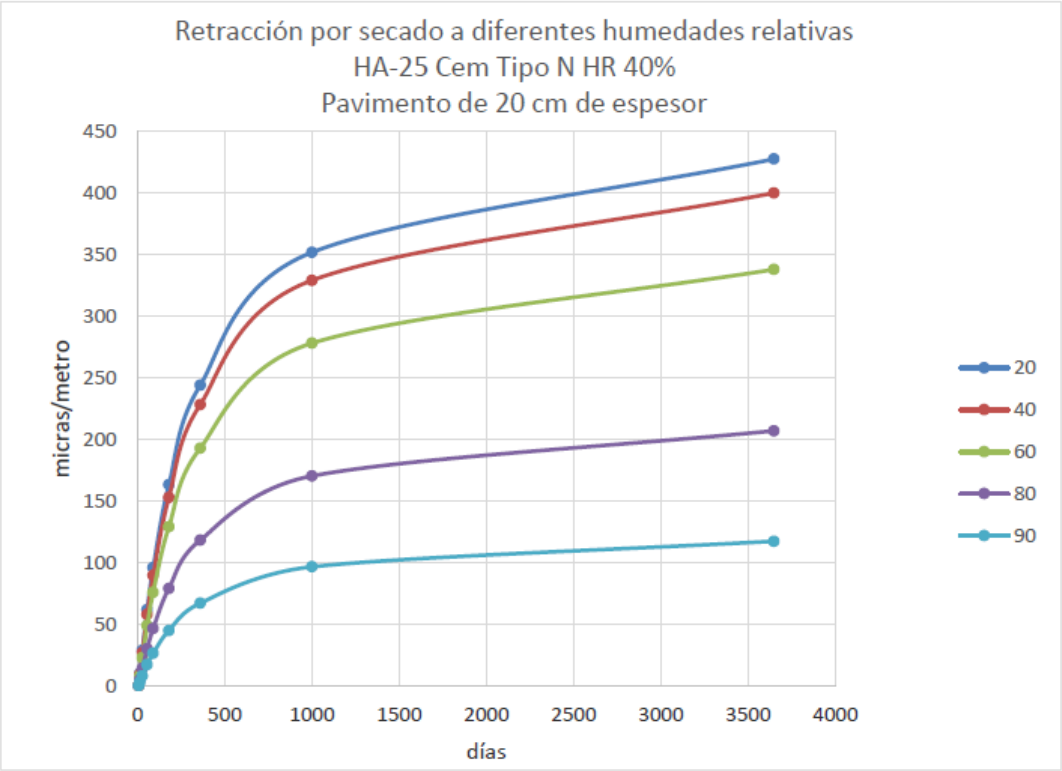


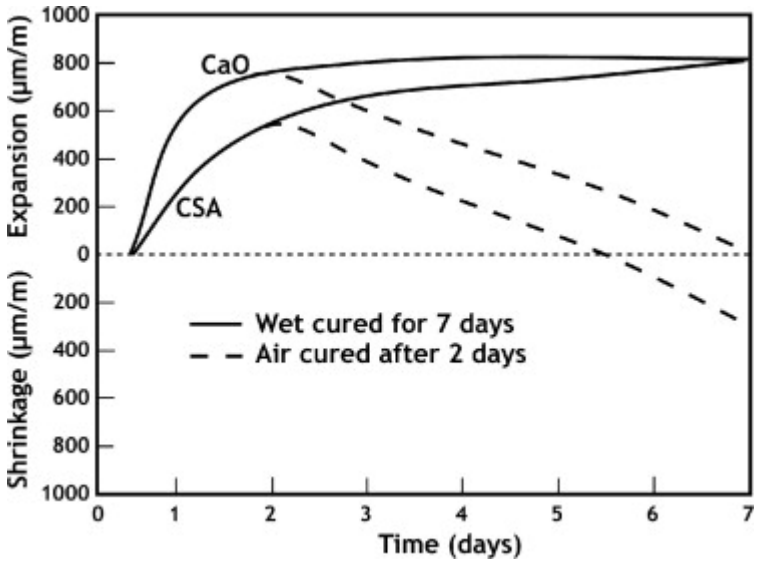
Figura 190. Retracción por secado Eurocódigo 2 (20 cm/Ha-25/Cem tipo N)

2.6.2. Diseño de mezcla de hormigones con agentes expansivos

Los hormigones de retracción compensada y los pretensados químicamente tienen una composición similar a los convencionales, con excepción de la incorporación del agente expansivo. Sin embargo, la naturaleza y características de los materiales empleados influyen en el grado de expansión final del hormigón, por lo que deben tenerse en cuenta en la fase de diseño para lograr el objetivo de expansión deseado.

Los agentes expansivos, son materiales que, durante el periodo de hidratación del hormigón, se hidratan expandiéndose ellos mismos, o bien reaccionan con otros constituyentes del cemento para causar dicha expansión. Tenemos principalmente dos tipologías: la primera en base sulfoaluminato o aluminato de calcio, que reaccionan con el yeso y el agua para formar ettringita primaria; y la segunda en base óxido de calcio, que reacciona con agua para formar hidróxido de calcio cristalino (portlandita).

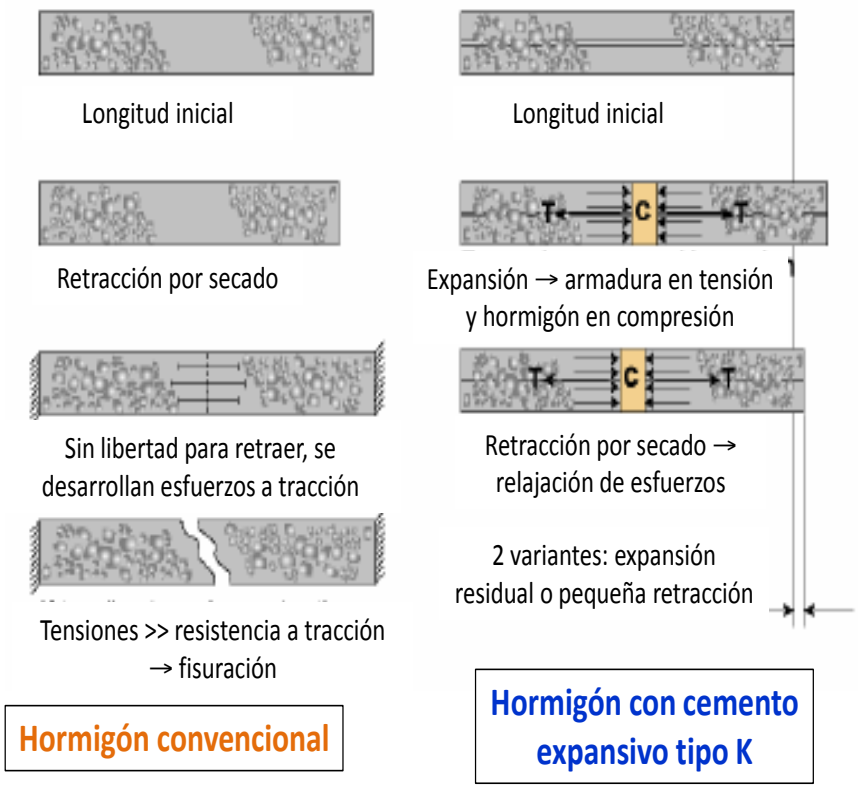
Por su propia naturaleza, los agentes expansivos basados en óxido de calcio tienden a reaccionar más rápidamente que los que promueven la formación de etringita, siendo estos últimos más dependientes de la cantidad de agua disponible durante la fase de curado



Distintas velocidades de expansión para aditivos con mecanismo de expansión basado en etringita (CSA) o en hidróxido cálcico (CaO) (Collepardi, Trolli et al.)

En función de la cantidad de agente expansivo incorporado, podemos llegar a conseguir hormigones de retracción compensada o, aumentando su dosificación, hormigones pretensados químicamente. En cualquier caso, la bibliografía especializada sobre la materia indica que no debe superarse el 15% sobre peso de cemento, con cualquiera de los productos mencionados.

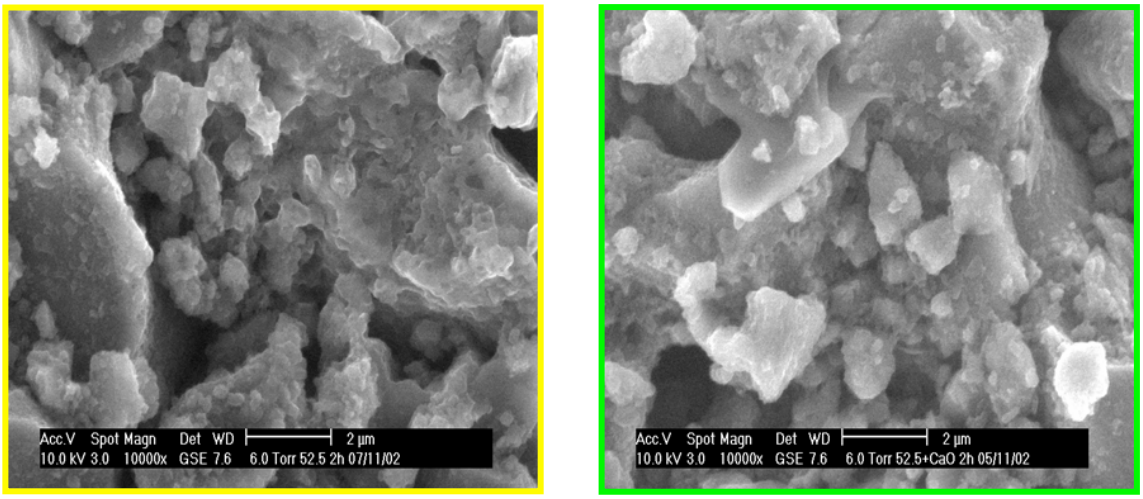
Los productos expansivos de expansión controlada generan tensiones de tracción en el armado y compresión en el hormigón. El porcentaje de armadura mínimo, entendido como relación entre el área del hierro y la sección del hormigón, no debe ser inferior al 0,15%. Esta “precompresión” inducida por el agente expansivo en el armado impide que las solicitaciones de tracción inducidas en el conglomerado por efecto de la retracción por secado superen la resistencia a tracción del material, evitando su fisuración.



Muestra del comportamiento resistente de hormigones convencionales y hormigones con cemento expansivo (o cemento + agente expansivo) a la fisuración por retracción por secado (Guía para el empleo de hormigones expansivos, XXXXXXXXXXXXXXX, adaptado de Mehta y Monteiro, 2006)

El grado de expansión depende del porcentaje de agente expansivo, de la relación agua-cemento adoptada (si aumenta la relación a/c, disminuye la expansión), del tipo y de la naturaleza del árido, del tipo y de la dosificación de cemento (factores que aumentan la velocidad de hidratación del cemento disminuyen la expansión, como el grado de finura, por ejemplo). La expansión, además, está influenciada por el tiempo de mezcla de la masa (si aumenta el tiempo, disminuye la expansión), la temperatura (si aumenta la temperatura, disminuye la expansión), y el método y la duración del curado. En general, todo aquello que acelere la formación de etringita mientras el hormigón está en estado plástico reducirá el grado de expansión, ya que las deformaciones se disipan, anulando el efecto expansivo.

Como estamos tratando de explicar, estos productos expansivos requieren un conocimiento profundo de sus características, modo de funcionamiento, riesgos y limitaciones para su manejo y aplicación. Ni son soluciones mágicas ni tienen sentido si no se consideran dentro de una estrategia global de un hormigón de retracción compensada u hormigón pretensado químicamente, que incluye un análisis de todos los factores enumerados con anterioridad para un diseño correcto de la mezcla.

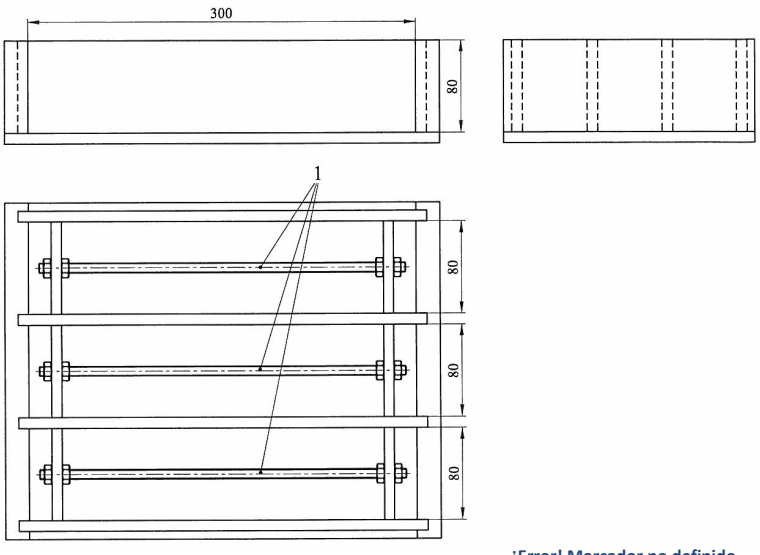


Imágenes de la microestructura de un hormigón a las 2 horas de su fabricación (patrón a la izquierda, hormigón con expansor en base CaO a la derecha). Nótese la diferencia en la cristalización (Foto ESEM Mod. XL30 ESEM-FEG–Philips)

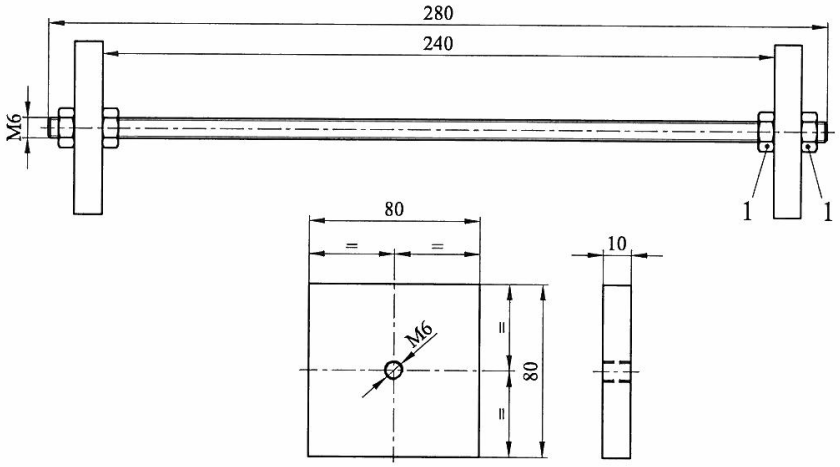
2.6.3. Métodos normalizados de medida.

En Europa, la única norma existente en la actualidad para la medida de las expansiones en prismas restringidos uniaxialmente es la italiana UNI 8148, basada en la norma ASTM C878, aunque con dimensiones ligeramente diferentes tanto para los moldes como para la restraining cage.

Al igual que en la ASTM C878, la medida inicial se realiza tras el fraguado, lo que puede solucionarse en parte si la medida inicial se hace sobre la restraining cage, antes del moldeo previo a las operaciones de fabricación de las probetas. En ese sentido, deben cuidarse tanto las variaciones de temperatura de las varillas roscadas como la propia fabricación de las probetas, de manera que se altere lo mínimo posible la longitud inicial que se ha tomado.



Moldes de ensayo en la norma UNI 8148[¡Error! Marcador no definido.].



Restraining cage en la norma UNI 8148.

2.6.4. Ejemplo de dosificación y resultados.

Se adjunta a continuación un ejemplo de estudio de expansión realizado en 2017 con un agente expansivo en base CaO, siguiendo la norma UNI 8148, con medidas iniciales sobre la restraining cage. Indicar que, para facilidad de interpretación, se han eliminado los resultados de las probetas sumergidas en agua (curado en inmersión), dejando únicamente los valores de las probetas curadas en ambiente laboratorio (23 ^{o}C, 50% H.R.). Así mismo, debemos considerar que estas probetas, una vez desenmoldadas y durante los tres primeros días, se encuentran envueltas en un film plástico, para evitar la pérdida de agua y posibilitar la correcta expansión.

		Patrón	Expansor 5%	Expansor 6.5%	Expansor 8%	Expansor 10%	Expansor 11.5%	Expansor 13.5%
Arena 0/4 Granitica	Kg/m3	320	305	300	295	290	285	280
Arena 0/5 Granitica	Kg/m3	640	640	640	640	640	640	640
Gravilla 4/10 Granitica	Kg/m3	150	150	150	150	150	150	150
Grava 10/20 Granitica	Kg/m3	720	720	720	720	720	720	720
CEM I 52,5R	Kg/m3	300	300	300	300	300	300	300
Expansor	Kg/m3	--	15	20	25	30	35	40
Superplastificante	Kg/m3	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5
Plastificante	Kg/m3	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4	2.4
Agua añadida	L/m3	170	170	170	170	170	170	170
Agua humedad áridos	L/m3	13	13	13	13	13	13	13
Agua Absorción áridos	L/m3	25	25	25	25	25	25	25
Agua total	L/m3	158	158	158	158	158	158	158
Relacion a/c	A/C	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527	0.527
Consistencia inicial	mm	160	180	180	180	180	180	180
Consistencia 30min	mm	120	160	160	160	160	160	160
Densidad en fresco	Kg/m3	2338	2335	2350	2348	2335	2333	2340
Aire	%	1.5%	1.7%	1.5%	1.5%	1.7%	1.6%	1.5%
RESISTENCIAS Compresión (Mpa)								
	24h	20.21	23.38	23.44	23.32	22.44	23.05	24.88
	7D	39.91	39.34	40.38	38.65	38.77	38.32	37.52
	28D	47.1	46.45	47.36	47.78	45.56	46.1	46.23
Resultados Retracción/Expansión (µm/m)		***UNI 8148***	***UNI 8148***	***UNI 8148***	***UNI 8148***	***UNI 8148***	***UNI 8148***	***UNI 8148***
CURADO DE PROBETAS (método*)		C.N. LAB.	C.N. LAB.	C.N. LAB.	C.N. LAB.	C.N. LAB.	C.N. LAB.	C.N. LAB.
	24h	44	246	164	231	283	411	400
	2D	-13	146	124	210	292	420	390
	3D	22	150	131	281	300	415	426
	4D	-28	162	140	290	320	417	435
	7D	-43	175	146	294	351	415	444
	14D	-210	-29	-51	42	28	103	146
	21D	-256	-106	-114	-78	-65	29	35
	28D	-322	-182	-169	-131	-124	-56	-33
	90D	-521	-363	-331	-294	-269	-226	-183
Observaciones		Buen aspecto	Buen aspecto	Buen aspecto	Buen aspecto	Buen aspecto	Buen aspecto	Buen aspecto

Cuadro resumen de ensayos de expansión con diferentes cuantías de agente expansor, siguiendo la norma UNI 8148.

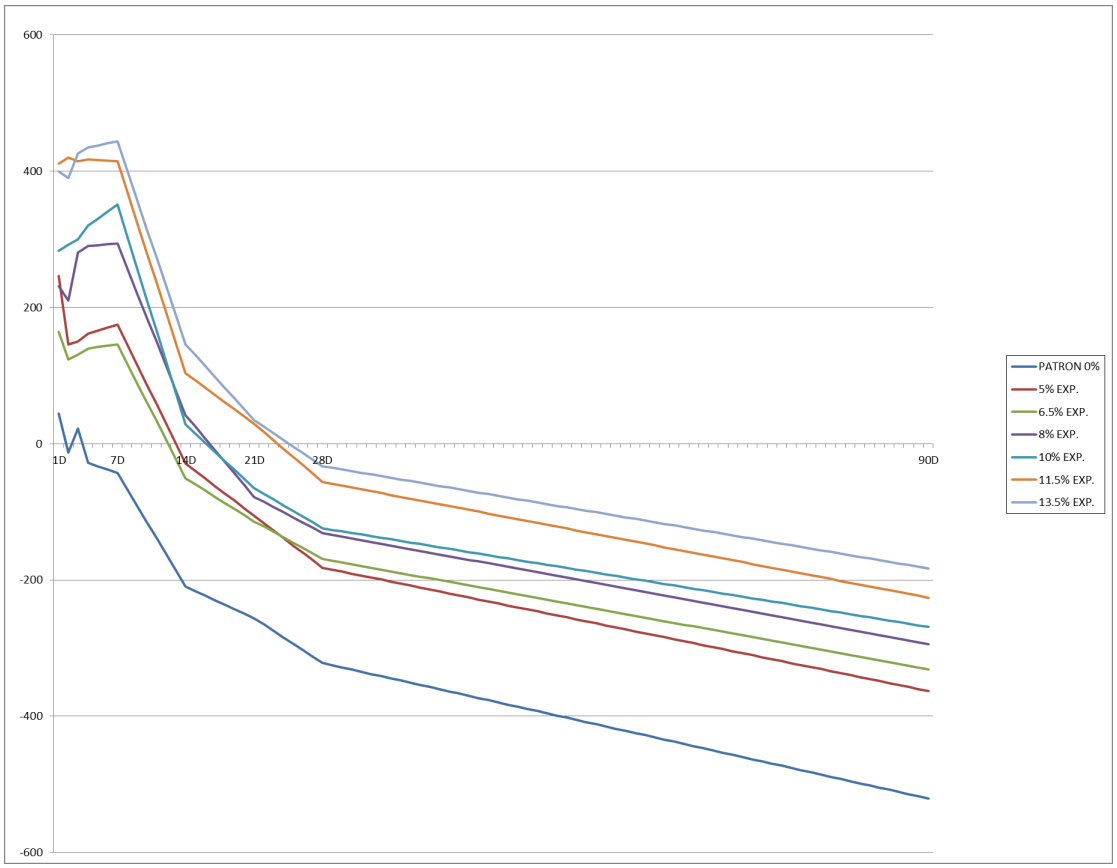


Gráfico resumen de ensayos de expansión con diferentes cuantías de agente expansor, siguiendo la norma UNI 8148.

2.6.5. Bibliografía.

- David Revuelta, Pedro Carballosa, J. Luis García, “Guía para el empleo de Hormigones Expansivos”. Monografías del IETcc nº 425, CSIC. España, 2018
- P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *Concrete: Microstructure, Properties and Materials*, 3rd ed., McGraw-Hill Companies, Inc. New York, 2006, 659 p., ISBN: 0071462899
- ACI committee 223, ACI 223R-10, *Guide for the Use of Shrinkage Compensating Concrete*, American Concrete Institute, 2010, 16p
- Taylor, H.F.W., “Cement chemistry”, Academic press ltd., London, 1990
- ASTM C845 / C845M-12, Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org
- Klein, A., and Troxell, G. E., "Studies of Calcium Sulfoaluminate Admixtures for Expansive Cements," *Proceedings,* ASTM, V. 58, 1958, pp. 986-1008
- M. Collepardi , R. Troli, M. Bressan, F. Liberatore, G. Sforza, 2008, “Crack-free concrete for outside industrial floors in the absence of wet curing and contraction joints”, Cement and Concrete Composites, Vol. 30, No 10*, pp. 887-891*
- UNE-EN 197-1:2011. Cemento. Parte 1: Composición, especificaciones y criterios de conformidad de los cementos comunes, Madrid: AENOR, 2011
- ASTM C150 / C150M-16e1, Standard Specification for Portland Cement, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org
- Kosmatka, S.; Kerkhoff, B.; and Panarese, W., 2002, “Design and Control of Concrete Mixtures,” 14th edition, Portland Cement Association, Skokie, IL, 372

- ASTM C806-12, Standard Test Method for Restrained Expansion of Expansive Cement Mortar, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012, www.astm.org
- ASTM C878 / C878M-14a, Standard Test Method for Restrained Expansion of Shrinkage-Compensating Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org
- Bertero, V. V., "Curing Effects on Expansion and Mechanical Behavior of Expansive Cement Concrete", *ACI Journal Proceedings,* 1967, V. 64, No. 2, February, pp. 84-96
- Ministerio de Fomento, Instrucción de Hormigón Estructural EHE-08, Real Decreto 1247/2008
- ASTM C157 / C157M-08(2014)e1, Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2014, www.astm.org
- Calo, D., Fernández Luco, L., "Shrinkage Compensated Concrete–Critical analysis and modifications of ASTM C878 for determining the restrained expansion." 5th. International Colloquium Industrial Floors, Technische Akademie Esslingen, Alemania, 2003
- Ente Nazionale Italiano di Unificazione (UNI), UNI 8148 *Not metallic expansive agents for cement mixings - determination of restrained expansion of concrete*, 2008