

- Instituto Técnico de la Construcción y del Cemento -

617-53 EXPANSION DEL CEMENTO EN LA HIDRATACION.

(Über die Ausdehnung von Zement bei der Hydratisierung)

De: "ZEMENT-KALK-GIPS", vol. 7, nº 3, marzo 1954, pág. 92

La Portland Cement Association (Chicago) ha publicado en su boletín nº 45 (junio 1953) un extenso trabajo (170 pág.) de Gonnermann, Lerch y Whiteside, que, de una forma amplia, se ocupa de esta cuestión. Inicialmente se llama la atención sobre el hecho de que un cemento con gran expansión en la hidratación, a la larga, no puede dar hormigones estables. Por este motivo se sigue actualmente la norma americana de la prueba en autoclave. Las principales causas de una mayor expansión son principalmente CaO libre, MgO cristalizado y un % elevado de SO₃; los efectos de este último no se aprecian en cualquier prueba rápida de estabilidad. Se menciona, además, que, según los ensayos de Bogue en clinker enfriado lentamente, el contenido en C₃A cristalino provoca una fuerte expansión en el autoclave, si sobrepasa de 6-8%, mientras que en clinker enfriado rápidamente la elevación del contenido en C₃A no ejerce influencia apreciable. La tabla I indica como reaccionan los minerales aislados del clinker por conservación en agua y por tratamiento en autoclave, respectivamente. Las máximas resistencias a la compresión proceden de los silicatos, influyendo favorablemente el tratamiento en autoclave sobre la resistencia inicial. En la mezcla con los silicatos, el C₃A influye favorablemente sobre la resistencia. El C₄AF actúa, en su mezcla con los silicatos, siempre de forma favorable, pero la resistencia final vuelve a ser intermedia entre la de los silicatos puros y la de la mezcla del silicato con C₃A. En las variaciones de longitud medidas, por conservación en agua, sólo los

T A B L A I

COMPORTAMIENTO DE LOS MINERALES DEL CLINKER POR CONSERVACION EN AGUA Y POR TRATAMIENTO EN AUTÓCLAVE
(Adición de yeso con 1,8% SO₃ superficie específica de 2.200 cm²/g según Wagner)

Compuesto	Conser- vación.	Resist. a la compresión del mortero 1:3 con arena nor- mal (Kg/cm ²)						Pasta pura de cemento c/40% de agua en recipiente cerrado						Variación de longitud (%) de las probetas de pasta pura								
		3 d.	7 d.	28d.	3 m.	6 m.	1 a.	3 d.	28 d.	1 a.	3 d.	7 d.	28 d.	3 m.	6 m.	1 a.	3 d.	7 d.	28 d.	3 m.	6 m.	1 a.
β C ₂ S	Agua	7	16	47	170	270	294	1,9	4,3	13,8	5	14	33	+0,006	+0,006	+0,006	+0,012	+0,012	+0,012			
	Autoclave	310	364	472	440	490	493	6,5	7,1	8,0	25	32	32	-0,052	-0,052	-0,052	-0,052	-0,052	-0,052			
C ₃ S	Agua	157	224	403	415	548	562	13,6	19,8	21,2	62	88	95	0	0	0	+0,013	+0,013	+0,013			
	Autoclave	342	347	394	368	394	448	15,6	16,1	16,4	79	83	84	-0,031	-0,025	-0,025	-0,019	-0,019	-0,019			
C ₃ A	Agua	7	8	16	x			16,6	19,4	25,0	-94	101	141	+0,256	+0,545	x	x	x	x	x	x	x
	Autoclave	x	x	x	x	x	x	36,4	36,5	37,0	202	201	204	x	x	x	x	x	x	x	x	x
C ₄ AF	Agua	32	35	44	90	-	218	17,8	20,1	30,0	-	-	-	+0,214	+0,320	+0,550	+1,27	+1,65	x			
	Autoclave	45	46	54	55	-	126	24,5	25,4	25,8	-	-	-	-0,025	-0,019	0,006	+0,019	+0,037	+0,037			
C ₂ S 50 %	Agua	7	87	200	318	388	459	8,9	14,9	17,4	45	57	67	0	0	+0,010	+0,016	+0,010	+0,021			
C ₂ S 50 %	Autoclave	308	360	373	398	455	515	10,3	11,1	12,9	57	58	57	-0,040	-0,030	-0,030	-0,030	-0,030	-0,030			
C ₂ S 42,5%	Agua	72	120	236	370	444	550	12,2	16,7	22,0	72	91	96	+0,050	+0,087	+0,112	+0,119	+0,119	+0,137			
C ₂ S 42,5%	Autoclave	283	309	326	320	416	510	12,9	14,0	16,0	82	87	89	+0,980	+0,980	+0,980	+0,983	+0,989	+0,989			
C ₃ A 15,0%	Autoclave	283	309	326	320	416	510	12,9	14,0	16,0	82	87	89	+0,980	+0,980	+0,980	+0,983	+0,989	+0,989			
C ₃ S 42,5%	Agua	39	61	144	238	315	413	9,0	12,7	16,1	35	50	-	+0,006	+0,010	+0,022	+0,035	+0,053	+0,060			
C ₃ S 42,5%	Autoclave	272	276	316	294	371	461	9,1	9,5	9,3	43	48	-	-0,032	-0,026	-0,020	-0,020	-0,020	-0,020			
C ₄ AF 15,0%	Autoclave	272	276	316	294	371	461	9,1	9,5	9,3	43	48	-	-0,032	-0,026	-0,020	-0,020	-0,020	-0,020			
C ₂ S 47,5%	Agua	49	66	142	282	328	450	10,6	15,1	18,2	36	53	63	+0,003	+0,003	+0,031	+0,057	+0,062	+0,088			
C ₂ S 47,5%	Autoclave	292	263	265	227	301	392	12,8	13,0	13,3	47	57	57	+1,000	+1,000	+1,010	+1,016	+1,016	+1,016			
H ₂ O 5,0%	Autoclave	292	263	265	227	301	392	12,8	13,0	13,3	47	57	57	+1,000	+1,000	+1,010	+1,016	+1,016	+1,016			

La conservación en agua significa un día en el molde y después bajo agua. La conservación en autoclave: 1 día en el molde, 1 día en autoclave. Tratamiento hasta la temperatura de 178°C, después bajo agua; x = destruido. La conservación en recipiente cerrado significa conservación en agua. La conservación para la medida de variación de longitud fué en todo caso conservación en agua.

compuestos de Al_2O_3 muestran los mayores valores, que en el C_3A conducen inmediatamente a la desintegración. Por tratamiento en autoclave se llega en el caso del C_3A a la destrucción rápida, mientras que en el C_4AF los valores se mantienen pequeños. En la mezcla de minerales de clinker choca la hinchazón de la mezcla con 15% de C_3A por el tratamiento en autoclave.

Para determinar en qué extensión la cal libre influye sobre la dilatación en autoclave, se han emprendido una serie de experiencias usando como base cementos de diferente composición, y conteniendo cantidades variables de cal libre. Estos ensayos, que están indicados en las tablas 2 y 3, muestran que las dilataciones en autoclave aumentan con contenidos crecientes de cal libre; sin embargo, con mayor tiempo de permanencia serían menores. Los cementos deben conservarse en depósitos cerrados y las pruebas deben repetirse tres veces, la segunda nueve meses después que la primera y la tercera dos meses después que la segunda.

Cementos con un contenido alto en cal libre mostraron ya durante las primeras 24 horas, una fuerte expansión. Con un contenido en MgO por debajo de 5%, las dilataciones en autoclave son pequeñas, si el contenido en cal libre es bajo; pero para una proporción de MgO superior al 7% se obtuvieron valores grandes, incluso con pequeños contenidos en cal libre.

La influencia de enfriamientos lentos y rápidos sobre la expansión, a consecuencia del contenido en MgO , fué ya tratada por Lerch y Taylor. Encontraron que en los cementos con un contenido de más de 2,5% de MgO la expansión en autoclave, por enfriamiento rápido, podía llegar a ser fuerte. La tabla IV contiene algunos ejemplos. Fueron investigados cementos de composiciones diferentes, tal como fueron suministrados (W); posterior

T A B L A II

VARIACIONES DE LONGITUD PARA DIFERENTES CEMENTOS CON CONTENIDO CRECIENTE DE MgO Y CONTENIDOS VARIABLES DE CAL LIBRE

Contenido de MgO (%)	Minerales del clinker (%)	Cal libre (%)	Autoclave expansión (%)	Variaciones de Longitud en las probetas 22 x 25 x 281 mm. (%)									
				Al aire					En agua				
				6 m.	1 a.	2 a.	5 a.	10 a.	6 m.	1 a.	2 a.	5 a.	10 a.
1,01-1,96	C ₃ S: 46-52	0,5	+0,028	-0,170	-0,179	-0,169	-0,163	-0,170	+0,045	+0,059	+0,077	+0,099	+0,110
	C ₂ S: 26-32	0,9	+0,086	-0,130	-0,132	-0,134	-0,100	-0,101	+0,070	+0,090	+0,104	+0,129	+0,141
	C ₃ A: 7	1,4	+0,068	-0,135	-0,134	-0,138	-0,104	-0,104	+0,060	+0,078	+0,092	+0,118	+0,128
	C ₄ AF: 12	2,2	+10,2	-0,055	+0,052	+0,319	+0,416	+0,434	+0,110	+0,130	+0,149	+0,181	+0,195
2,95-3,34	C ₃ S: 38-42	0	+0,030	-0,167	-0,174	-0,191	-0,164	-0,172	+0,070	+0,086	+0,104	+0,138	+0,154
	C ₂ S: 34-38	1,1	+0,136	-0,145	-0,144	-0,154	-0,125	-0,131	+0,090	+0,105	+0,123	+0,158	+0,176
	C ₃ A: 6-7	1,8	+0,275	-0,107	-0,102	-0,098	-0,034	-0,011	+0,110	+0,140	+0,166	+0,208	+0,230
	C ₄ AF: 12	2,6	+0,266	-0,115	-0,114	-0,118	-0,065	-0,050	-0,120	+0,140	+0,164	+0,203	+0,224
4,04-4,17	C ₃ S: 39-50	0,3	+0,123	-0,175	-0,186	-0,196	-0,169	-0,176	+0,090	+0,107	+0,134	+0,171	+0,190
	C ₂ S: 25-34	0,5	+0,253	-0,170	-0,178	-0,184	-0,154	-0,158	+0,075	+0,099	+0,124	+0,163	+0,188
	C ₃ A: 6-7	1,9	+1,985	-0,100	-0,005	-0,040	+0,066	+0,096	+0,140	+0,172	+0,212	+0,264	+0,302
	C ₄ AF: 12	2,7	+10,8	-0,050	+0,046	+0,250	+0,349	+0,382	+0,175	+0,208	+0,252	+0,312	+0,350
4,61-4,91	C ₃ S: 39-48	0,6	+0,210	-0,184	-0,182	-0,177	-0,194	-0,211	+0,092	+0,113	+0,143	+0,175	+0,200
	C ₂ S: 26-33	1,0	+0,487	-0,130	-0,130	-0,120	-0,073	-0,060	+0,125	+0,151	+0,188	+0,235	+0,267
	C ₃ A: 6-7	2,1	+11,7	-0,025	+0,084	+0,399	+0,511	+0,549	+0,190	+0,230	+0,287	+0,357	+0,406
	C ₄ AF: 12	2,8	+14,75	+0,250	+0,694	+0,938	+1,151	+1,341	+0,225	+0,272	+0,334	+0,412	+0,467
6,95-7,26	C ₃ S: 37-50	0,3	+13,3	-0,150	-0,154	-0,148	-0,107	-0,107	+0,105	+0,135	+0,176	+0,233	+0,271
	C ₂ S: 23-33	0,7	+11,3	-0,150	-0,141	-0,130	-0,081	-0,068	+0,145	+0,181	+0,234	+0,302	+0,348
	C ₃ A: 6-7	1,6	+3,05	-0,085	-0,072	-0,028	+0,082	+0,110	+0,180	+0,221	+0,286	+0,366	+0,420
	C ₄ AF: 12	3,5	+21,1	+0,720	+0,902	+1,141	+1,432	+1,421	+0,325	+0,398	+0,512	+0,644	+0,734

T A B L A I I I

RESISTENCIAS PARA LOS CEMENTOS DE LA TABLA II (KG/CM²) POR CONSERVACION EN AGUA (1:2; AGUA/CEMENTO = 0,33)

Contenido de MgO (%)	Cal libre (%)	Resistencia a la tracción con flexión						Resistencia a la compresión					
		28 d.	3 m.	1 a.	3 a.	5 a.	10 a.	28 d.	3 m.	1 a.	3 a.	5 a.	10 a.
1,01-1,96	0,5	86	96	100	111	94	100	700	794	866	937	1000	982
	0,9	79	93	93	103	96	103	634	784	866	924	950	986
	1,4	82	94	94	100	99	96	640	742	828	866	948	958
	2,2	78	86	98	96	105	96		723	804	859	930	834
2,95-3,34	0	86	89	96	-	100	100	656	801	856	-	1013	992
	1,1	82	-	97	-	94	94	573	-	828	-	944	866
	1,8	78	-	93	-	92	92	571	-	808	-	952	940
	2,6	81	-	89	-	93	93	591	-	810	-	917	918
4,04-4,17	0,3	94	96	102	106	104	110	642	765	829	911	964	978
	0,5	92	92	98	103	96	102	619	743	835	909	908	850
	1,9	86	91	89	89	95	99	610	709	798	884	929	905
	2,7	81	85	98	98	93	100	601	720	820	895	943	905
4,61-4,91	0,6	80	-	98	94	92	86	614	-	757	864	786	878
	1,0	82	85	94	99	101	98	619	726	801	879	909	892
	2,1	80	80	90	85	95	99	612	713	792	842	916	914
	2,8	77	79	87	95	91	94	578	685	807	848	873	816
6,95-7,26	0,3	65	90	94	97	99	105	656	743	833	877	930	906
	0,7	64	87	94	100	92	106	630	740	812	893	898	892
	1,6	86	89	95	99	98	107	619	722	787	870	887	920
	3,5	77	81	92	87	92	102	556	679	736	822	842	883

1
6

T A B L A I V

INFLUENCIA DEL ENFRIAMIENTO SOBRE LA EXPANSION EN AUTOCLAVE EN LOS CEMENTOS QUE CONTIENEN MgO

Clinker	% MgO	Tratamiento	Cal libre	Expansión en auto-clave (%)
C ₂ S : 48-53	3,1	L	0,4	5,7
C ₂ S : 22-26		W	1,2	3,2
C ₃ A : 12-13		S	1,5	10,6
C ₄ AF: 6-7				
C ₂ S : 53-59	1,8	L	0,1	0,027
C ₂ S : 16-19		W	0,8	0,142
C ₃ A : 5-6		S	0,9	0,116
C ₄ AF: 16-17				
C ₂ S : 45-47	4,0	L	0,2	10,6
C ₂ S : 29-30		W	0,4	0,66
C ₃ A : 10-11		S	0,4	0,17
C ₄ AF: 8				
C ₂ S : 48-50	4,7	L	0,1	12,8
C ₂ S : 26-27		W	0,6	0,836
C ₃ A : 10		S	0,5	0,113
C ₄ AF: 9				
C ₂ S : 56-60	1,0	L	0,3	0,318
C ₂ S : 12-15		W	1,3	0,371
C ₃ A : 13-14		S	1,4	0,148
C ₄ AF: 12				

1
10
1

mente, algunas muestras de estos clinkers fueron calentadas de nuevo hasta la temperatura de sinterización, y a continuación se enfriaron, en parte lentamente (L), en parte rápidamente (S). En los casos de enfriamiento lento se desarrolla inmediatamente la expansión en autoclave para los valores superiores al 2,5% en MgO, mientras que en el caso de enfriamiento rápido el valor del contenido de MgO, con excepción de casos extraordinarios, apenas tiene importancia. La causa se halla en el tamaño de los cristales de periclasa formados. Mientras que los tamaños medios de los cristales de periclasa en las muestras suministradas se eleva a 15μ , por enfriamiento lento resulta un clinker de 22μ y por enfriamiento rápido, de 10μ .

La influencia del C_3A y la magnesia sobre la expansión, tanto en autoclave como por conservación en agua y al aire, queda patente en la tabla V (en ella L significa enfriamiento lento y S, rápido). Los contenidos en cal libre eran, en todas las experiencias, muy pequeños. En el caso de contenidos bajos en MgO, se observa claramente un aumento de la dilatación en autoclave para contenidos crecientes de C_3A . Todo esto se refiere principalmente al C_3A cristalino, formado por enfriamiento lento, y no al clinker que, enfriado rápidamente, no contendrá apenas C_3A cristalino. En el caso de conservación de las probetas en agua o al aire, no aparece ninguna diferencia notable en la influencia de C_3A en el fenómeno, ya se haya enfriado rápida o lentamente.

Los ensayos realizados con clinker de contenidos crecientes de C_4AF indicaron que también este componente del clinker -aunque en cantidades pequeñas- provoca un aumento de la expansión en autoclave y del entumecimiento en agua.

La tabla VI indica cuales son las diferencias de los

T A B L A V

INFLUENCIA SOBRE LA EXPANSION DEL CONTENIDO DEL CLINKER EN C₃A Y MgO

Variaciones de longitud en las probetas de pasta pura 25 x 25 x 281 mm. (%)											
				En agua				Al aire			
				28 d.	1 a.	5 a.	10 a.	28 d.	1 a.	5 a.	10 a.
3	1,2	L	+0,1	+0,050	+0,095	+0,140	+0,153	-0,264	-0,284	-0,306	-0,349
		S	-0,1	+0,036	+0,073	+0,108	+0,122	-0,275	-0,284	-0,298	-0,344
6	1,4	L	+0,1	+0,024	+0,043	+0,066	+0,068	-0,178	-0,360	-0,412	-0,440
5	1,5	S	+0,1	+0,048	+0,088	+0,116	+0,124	-0,154	-0,243	-0,288	-0,315
14	0,8	L	+0,3	+0,039	+0,074	+0,098	+0,098	-0,210	-0,271		
		S	+0,2	+0,047	+0,093	+0,128	+0,130	-0,125	-0,158	-0,165	-0,183
16	0,9	L	+0,5	+0,038	+0,066	+0,088	+0,090	-0,268	-0,314	-0,406	-0,468
		S	+0,2	+0,027	+0,062	+0,088	+0,096	-0,198	-0,224	-0,276	-0,318
2	6,1	L	+7,2	+0,046	+0,135	+0,230	+0,276	-0,271	-0,280	-0,328	-0,347
		S	+9,4	+0,070	+0,182	+0,284	+0,276	-0,248	-0,290	-0,352	-0,355
6	4,8	L	+7,8	+0,038	+0,121	+0,192	+0,232	-0,150	-0,165	-0,184	-0,208
		S	+0,2	+0,058	+0,136	+0,190	+0,214	-0,169	-0,180	-0,203	-0,234
15	5,0	L	+11,1	+0,055	+0,139	+0,230	+0,274	-0,233	-0,334	-0,380	-0,403
		S	+0,8	+0,044	+0,133	+0,199	+0,228	-0,177	-0,251	-0,295	-0,313

I . A . B . L . A . V I

COMPORTAMIENTO DE LOS TIPOS DE CEMENTOS AMERICANOS POR ENTUMECIMIENTO, RETRACCION Y EN AUTOCLAVE

Minerales del clinker (%)				Variación de long. de las probetas de pasta pura (%)				Expansión en autoclave (%)
				Al aire		En agua		
C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	90 d.	10 a.	90 d.	10 a.	
Cementos portland normales (tipo I)								
57	19	0	13	-0,311	-0,332	+0,100	+0,206	+0,496
57	18	1	16	-0,285	-0,352	+0,067	+0,112	+0,022
41	27	10	13	-0,386	-0,438	+0,096	+0,179	+0,186
45	25	14	8	-0,399	-	+0,102	+0,210	+0,229
Cementos portland de alta resistencia (tipo III)								
65	9	7	10	-0,255	-0,272	+0,024	+0,147	-0,023
59	12	9	13	-0,272	-0,261	+0,025	+0,144	+0,018
64	8	10	9	-0,284	-0,284	+0,062	+0,294	+0,105
61	13	12	7	-0,345	-0,352	+0,063	+0,284	+0,081
73	0	14	7	-0,245	-0,213	+0,040	+0,184	+0,273
Cementos portland de bajo calor de hidratación								
16	55	6	16	-0,268	-0,351	+0,056	+0,138	+0,036
29	54	6	5	-0,183	-0,221	+0,066	+0,147	+0,058
23	48	5	16	-0,321	-0,373	+0,072	+0,186	+0,141
Cementos portland resistentes a los sulfatos								
31	47	4	12	-0,145	-0,225	+0,040	+0,075	+0,141
52	26	2	13	-0,244	-0,396	+0,041	+0,122	+0,026
Cementos portland porosos								
45	28	8	13	-0,222	-0,350	+0,041	+0,137	+0,039
52	21	7	13	-0,377	-0,401	+0,078	+0,164	+0,066
Cementos de ensayo y especiales								
27	42	4	16	-0,216	-0,183	+0,062	+0,222	+0,200
36	35	8	10	-0,251	-0,200	+0,071	+0,246	+0,350
45	28	9	7	-0,225	-0,171	+0,063	+0,258	+0,700
48	28	16	1	-0,200	-	+0,100	+0,305	+0,061
67	-	2	11	resist. +, destruido		7,600	-	31,0

1
12
1

distintos tipos de cementos americanos en cuanto a análisis, retracción, entumecimiento y prueba del autoclave. En dicha tabla, para lograr una mayor sencillez, sólo se han representado los valores de las medidas al cabo de noventa días y de diez años, respectivamente.

Ulteriormente se hicieron ensayos para observar en qué forma influyen distintas exposiciones prolongadas de las probe - tas en ambiente húmedo; se determinó que las expansiones en autoclave, en el caso de una permanencia previa prolongada, se hacían menores. En el caso de cementos buenos, la expansión en autoclave, con una conservación mayor, apenas varía.

La influencia del contenido creciente de MgO sobre la resistencia queda aclarada en la tabla VII. Para estos ensayos, los cementos fueron fabricados en el laboratorio. Se estudió la resistencia a la compresión del hormigón, por conservación bajo agua y a la intemperie, en cilindros 7,5 x 15 cms., con una proporción de mezcla de 1:2,4:3,6. La sustitución creciente de CaO por MgO, con disminución del contenido de C_3S , disminuye, como es lógico, la resistencia; si el MgO no sustituye al CaO, la resistencia no queda tan perjudicada. Sin embargo, llama la aten - ción el crecimiento de la resistencia en el caso de contenido - alto de MgO (cementos 4,5, 9 y 10), desde 7 a 10%, hasta la edad de quince años. Solamente por conservación a la intemperie mos - tró el cemento nº 10 una caída de la resistencia. En ensayos con morteros plásticos, a consecuencia de un contenido en MgO alto, se presentan detrimentos al cabo de un año; en la mezcla plástica de arena normal 1:2,75, la resistencia disminuye ya con un - 4,7% de MgO y en el caso de mezclas idénticas 1:4,25 disminuye ya con 3,1% de MgO, si ésta entra en lugar de CaO en la mezcla. En el caso de cementos con valores normales en el contenido de

T A B L A V I I

INFLUENCIA DEL CONTENIDO CRECIENTE DE MgO SOBRE LA RESISTENCIA DEL HORMIGÓN

Nº	MgO (%)	CaO libre (%)	Expans. en auto clave (%)	Resistencia del hormigón a la compresión (Kg/cm ²) por conservación									
				En agua					Al aire libre				
				28 d.	1 a.	3 1/2 a.	5 a.	15 a.	28 d.	1 a.	3 1/2 a.	5 a.	15 a.
Sustitución de CaO por MgO - disminuyendo el contenido de C ₃ S													
1	1,2	0,3	0,02	371	407	502	509	485	332	348	400	373	440
2	3,1	0,3	0,06	288	423	490	496	506	298	344	412	406	439
3	4,7	0	0,16	284	397	506	497	528	283	339	385	363	460
4	7,1	0	> 10,0	256	384	469	465	504	256	339	357	346	436
5	9,7	0	> 10,0	211	344	351	435	445	211	300	370	329	342
MgO añadido - contenido constante de C ₃ S													
6	1,4	0,2	0,02	317	417	445	518	520	316	388	403	386	424
7	3,1	0,3	0,06	289	423	490	497	507	288	345	412	403	439
8	4,9	0,2	0,30	288	372	450	484	463	287	341	367	328	434
9	7,0	0,3	2,10	274	341	429	448	466	274	350	362	335	416
10	9,9	0,1	> 10,0	275	392	374	398	421	275	343	357	284	244

C_3S y de MgO adicional variable, disminuyen las resistencias en las mezclas plásticas 1:2,75 y 1:4,25 únicamente en los cementos 9 y 10, con contenidos de 7,0 y 9,9% de MgO .

T A B L A VIII

ANÁLISIS DE LOS CEMENTOS CITADOS EN LA TABLA VII, CON CONTENIDO ELEVADO DE MgO

Cemento nº	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
	Sustitución de CaO por MgO , disminuyendo el contenido de C_3S .					MgO añadido, contenido constante de C_3S				
SiO_2	22,9	22,7	23,3	22,7	23,0	23,4	22,7	22,3	21,5	20,2
Al_2O_3	6,1	6,1	5,8	6,2	6,3	6,3	6,1	6,2	6,1	6,0
Fe_2O_3	3,1	3,2	2,9	3,2	3,3	3,1	3,2	3,1	3,1	3,1
CaO	66,3	64,4	62,9	60,5	57,2	65,5	64,4	63,2	61,9	60,4
MgO	1,2	3,1	4,7	7,1	9,7	1,4	3,1	4,9	7,0	9,9
Libre CaO	0,3	0,3	0	0	0	0,2	0,3	0,2	0,3	0,1
C_3S	43	43	36	27	11	41	43	41	42	47
C_2S	29	33	40	45	58	35	33	33	30	23
C_3A	11	11	10	11	11	11	11	11	11	11
C_4AF	9	10	9	10	10	9	10	9	9	9

Resumiendo, podemos decir:

1. Las causas principales de la falta de estabilidad del cemento son el CaO libre y el MgO cristalino.

2. Los ensayos de la torta detectan sólo la inestabilidad causada por el CaO libre y no la debida al MgO .

3. La prueba en autoclave permite conocer la expansión causada por el CaO libre, MgO y el C₃A cristalino, o cualquier combinación de ellos.

4. El enfriamiento rápido del clinker elimina la expansión provocada por MgO o C₃A, pero no la causada por el CaO libre.

5. Los cementos con un contenido máximo en MgO de 5,0% y de C₃A hasta un 16% (siempre que la cantidad de CaO libre sea reducida), es fácil que presenten expansión al autoclave inferior al 0,5% (límite máximo admitido por las normas ASTM).

6. La expansión en autoclave por CaO libre puede ser disminuida por conservación al aire; no así la provocada por MgO.

7. Una mayor conservación en ambiente húmedo de la probeta reduce la expansión en autoclave.

8. El grado creciente de finura del cemento disminuye la expansión en el autoclave.

9. Se establece un paralelismo entre la expansión en autoclave por una parte y el entumecimiento de las pastas puras, morteros y hormigones por conservación en agua, por otra.

10. El entumecimiento de las pastas puras, morteros y hormigones por conservación en agua aumenta con un contenido creciente de CaO y MgO libres, pero no con el contenido de C₃A cristalino.

11. Cementos con 3-5% de MgO, procedentes de clinkers enfriados rápidamente, ofrecen claramente una expansión en autoclave más pequeña que los procedentes de clinkers enfriados lentamente. En el caso de conservación en agua no se presenta, después de

diez años, ninguna diferencia notable entre ambos; se puede suponer que la hidratación de MgO cristalino, en ciertas circunstancias, no progresa ulteriormente.

12. La retracción de las probetas de pasta pura, por conservación al aire, disminuye con contenido creciente de CaO libre; con un contenido alto se presenta inmediatamente entumecimiento, siendo los mayores valores como en el caso de permanencia en agua. La retracción de las probetas de mortero disminuye en todo caso, con contenido creciente de CaO libre, no observándose expansiones posteriores.

13. Los contenidos crecientes de MgO disminuyen algo la retracción de las probetas de pasta pura y de mortero, conservadas al aire.

14. Se justifica la falta de relación entre la conducta en la expansión de un cemento y su resistencia. S. F. S.

- - -