

Estudio sobre el contenido óptimo de yeso en los cementos, su influencia en las resistencias iniciales

Drs. JUAN R. BARAGAÑO CORONAS y JULIO PEREZ ALONSO, del Centro de Investigación y Desarrollo ASLAND

INTRODUCCION

El tema del contenido óptimo de yeso en los cementos está ampliamente investigado, encontrándose estudios sobre el mismo tanto en los textos clásicos sobre cementos, Bogue (1), Taylor (2), Keil (3), como en revistas más o menos especializadas: Revue de Matériaux de Construction (4) (5) (6) (7), Zement-Kalk-Gips (8), Ultimos Avances (9) (10) (11), así como en los trabajos presentados en los distintos Congresos de la Química del Cemento, Whashington (12), Tokio (13) y Moscou (14).

La A.S.T.M. tiene publicado sobre el mismo tema la designación: C 563-72.

En la bibliografía se indican desde fórmulas matemáticas, como en el caso de LERCH (15), que propone que la cantidad de yeso mínimo a adicionar en un cemento venga dictada por la siguiente expresión

$$SO_3 = 0,092 (AC_3) + 1,71 (Na_2O) + 0,94 (K_2O) + 1,23$$

hasta los factores más variados que pueden influir en la velocidad de hidratación de los cementos (contenidos en SC_3 , SC_2 , AC_3 , AFC_4 , álcalis, cal libre, finura, enfriamiento del clínker, temperatura y tiempo de ensilado, así como la relación agua/cemento empleado en el amasado y la temperatura de curado entre otras); sin embargo, se llega a la conclusión que cada clínker es distinto y necesita un porcentaje ideal de yeso que hay que determinar para obtener las máximas resistencias mecánicas a corto plazo, la mínima expansión sumergido en agua y la más baja retracción de la pasta al aire.

Por otra parte, no todos los cementos son destinados para el mismo fin y su contenido en SO_3 debe estar en función de su aplicación y entorno.

Sin profundizar en detalle de las distintas teorías existentes, lo que sí parece claro es que depende, principalmente, de:

- a) Contenido de aluminato tricálcico.
- b) Contenido en álcalis.
- c) Finura del cemento.

Teniendo en cuenta todas estas premisas y su fin, hemos tratado de encauzar este estudio bajo los siguientes aspectos:

- 1.º Ensayo a escala de laboratorio.
- 2.º Ensayo industrial basado en los datos obtenidos anteriormente.
- 3.º Análisis estadístico de los cementos obtenidos industrialmente.

I. ENSAYO A ESCALA DE LABORATORIO

1. RESULTADO DE LOS ENSAYOS A ESCALA DE LABORATORIO

Para nuestros ensayos hemos partido de: clínker de hornos Lépol con alto contenido en SO_3 y álcalis, y clínker de hornos Allis-Chalmers de tiro abierto y, por ello, con mayores volatilizaciones de los compuestos alcalinos. (Fea. n.º 3).

De cada tipo de clínker se hicieron tres moliendas con distintas superficies Blaine: 2.500, 3.500 y 4.500 cm^2/g , esto es, las alcanzadas en los cementos puzolánico y P-350, P-450 y P-450 ARI, respectivamente.

En cada serie se añadió yeso con un contenido en $\text{SO}_4\text{Ca}\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ de 97,4 % equivalente a un 45,3 % de SO_3 molido a un rechazo de 10,0 sobre 4.900 mallas/ cm^2 y en contenidos que van de 1,5 a 7,0 % que, junto al SO_3 del clínker, hace que los doce tipos de cemento formados tengan un porcentaje de SO_3 desde un mínimo de 1,2 % a un máximo cercano al 4 %.

Ante la imposibilidad de realizar todos los ensayos a la vez y con el fin de evitar al máximo los errores, se ensayaron cada serie de doce cementos en un mismo día para realizar las roturas correspondientes a las 12, 16 y 24 horas, y en otro día, las correspondientes a 3, 7 y 28 días.

En cada tipo de cemento, además, se determinó el porcentaje total de SO_3 , finuras, S.E. Blaine, principio y fin de fraguado, expansión al autoclave y retracción a temperatura ambiente hasta la edad de 56 días.

Las roturas se realizaron con una prensa automática MOHR-FEDERHAFF a velocidad constante.

1.1. Análisis químico de los clínkeres empleados

	C L I N K E R Allis-Chalmers	Lépol
% RFH	0,2	0,2
% SiO_2	22,6	21,9
% Al_2O_3	5,2	5,3
% Fe_2O_3	2,4	2,4
% CO_2	64,3	64,4
% MgO	2,7	2,6
% SO_3	0,6	0,9
% K_2O	0,8	1,2
% Na_2O	0,3	0,4
% P.F.	0,6	0,7
% CaO libre	1,5	1,1
G.S.P.	90,6	93,2
G.S.R.	88,5	91,6
M.H.	2,1	2,2
M.S.	3,0	2,8
M.F.	2,2	2,2
% SC_3 (*)	45,5	52,2
% SC_2	30,6	23,5
% AC_3	9,7	10,0
% AFC_1	7,3	7,3
% SC_1/SC_2	1,5	2,2

(*) Obtenido según Bogue.

1.2. Datos alcanzados con clínker de hornos Allis-Chalmers

Se exponen a continuación, detallados en las tablas 1.2.1., 1.2.2. y 1.2.3., los valores logrados con clínkeres de hornos Allis-Chalmers al molerlos en un molino de bolas de laboratorio con los distintos porcentajes de yeso (1,5-7,0).

En los gráficos 1.2.1., 1.2.2. y 1.2.3. se representan dichos valores limitando por líneas verticales los considerados como óptimos dentro de los márgenes de error que se suelen cometer en esta clase de trabajos.

T A B L A 1.2.1.

Clínker Hornos Allis-Chalmers S.E.B. \approx 2.500

FINURA CLINKER			
900	4.900	10.000	S.E.B.
1,2	9,0	18,0	2.886

% Yeso añadido	% SO ₃ total	S.E.B. cm ² /g	FRAGUADO			% Expans. Autocl.	RESISTENCIAS MECANICAS					
			Agua	Inicial	Final		12 h	16 h	24 h	3 días	7 días	28 días
1,5	1,4	2.979	27	0 h 35 min	1 h 10 min	0,08	5/17	7/23	15/56	32/130	47/213	61/335
2,0	1,6	3.055	27	1 h 00 min	1 h 45 min	0,08	7/21	9/28	14/65	38/150	55/255	64/364
2,5	1,7	3.103	26	1 h 00 min	1 h 45 min	0,17	6/18	9/34	14/61	37/163	51/255	67/358
3,0	2,1	3.135	26	1 h 10 min	1 h 55 min	0,07	9/31	11/43	18/87	40/168	60/280	67/370
3,5	2,4	3.177	26	1 h 10 min	1 h 55 min	0,17	12/43	14/58	20/85	43/183	58/271	72/386
4,0	2,5	3.224	26	1 h 15 min	2 h 05 min	0,05	14/53	15/70	21/99	47/193	57/275	71/378
4,5	2,8	3.245	26	1 h 15 min	2 h 10 min	0,14	17/65	18/88	28/125	43/193	56/274	78/406
5,0	2,9	3.260	26	1 h 30 min	2 h 20 min	0,13	16/64	20/87	28/125	48/198	63/300	79/425
5,5	3,1	3.316	26	1 h 35 min	2 h 35 min	0,13	16/65	22/92	30/136	48/203	62/290	73/403
6,0	3,3	3.356	26	1 h 40 min	2 h 45 min	0,12	14/54	22/94	31/142	43/186	61/284	75/405
6,5	3,5	3.391	26	1 h 50 min	2 h 55 min	0,10	13/43	19/78	32/146	46/210	61/285	72/398
7,0	3,7	3.440	26	1 h 50 min	3 h 10 min	0,08	12/47	20/81	33/148	50/207	63/290	79/423

T A B L A 1.2.2.

Clínker Hornos Allis-Chalmers S.E.B. \approx 3.500

FINURA CLINKER			
900	4.900	10.000	S.E.B.
1,6	5,8	11,0	3.469

% Yeso añadido	% SO ₃ total	S.E.B. cm ² /g	FRAGUADO			% Expans. Autocl.	RESISTENCIAS MECANICAS					
			Agua	Inicial	Final		12 h	16 h	24 h	3 días	7 días	28 días
1,5	1,2	3.564	28	0 h 50 min	1 h 30 min	0,08	7/24	10/44	18/77	40/164	52/245	63/339
2,0	1,5	3.610	28	1 h 10 min	1 h 40 min	0,08	7/23	10/40	18/80	39/168	54/248	67/331
2,5	1,8	3.702	27	1 h 10 min	1 h 45 min	0,07	7/32	11/47	18/81	42/203	56/300	69/386
3,0	2,0	3.711	27	1 h 15 min	1 h 50 min	0,07	11/39	15/54	20/88	46/195	55/276	67/361
3,5	2,3	3.724	27	1 h 15 min	1 h 50 min	0,06	13/48	15/71	23/92	47/213	60/305	76/390
4,0	2,5	3.733	27	1 h 20 min	2 h 10 min	0,09	17/59	18/86	25/116	50/223	61/333	74/414
4,5	2,6	3.780	27	1 h 25 min	2 h 10 min	0,08	17/68	20/89	28/113	50/255	65/320	71/396
5,0	2,9	3.822	27	1 h 30 min	2 h 20 min	0,11	18/75	22/102	28/131	52/250	63/320	78/391
5,5	3,1	3.831	27	1 h 30 min	2 h 20 min	0,13	19/71	21/102	30/135	53/250	60/320	78/385
6,0	3,3	3.878	27	1 h 40 min	2 h 40 min	0,06	19/66	24/106	30/133	57/250	65/313	83/416
6,5	3,5	3.942	27	1 h 40 min	2 h 40 min	0,07	15/60	23/105	33/143	53/264	66/326	81/413
7,0	3,7	3.995	27	1 h 45 min	2 h 55 min	0,09	15/62	24/111	31/151	55/271	60/336	76/404

TABLA 1.2.3.

Clinker Hornos Allis-Chalmers S.E.B. \approx 4.500

FINURA CLINKER			
900	4.900	10.000	S.E.B.
3,8	8,8	16,0	4.714

% Yeso añadido	% SO ₃ total	S.E.B. cm ² /g	FRAGUADO			% Expans. Autocl.	RESISTENCIAS MECANICAS					
			Agua	Inicial	Final		12 h	16 h	24 h	3 días	7 días	28 días
1,5	1,3	4.802	30	0 h 30 min	1 h 05 min	0,06	10/32	13/50	19/71	32/141	39/176	51/246
2,0	1,7	4.852	30	0 h 50 min	1 h 15 min	0,06	11/43	16/57	23/105	42/170	55/210	68/320
2,5	1,9	4.939	29	1 h 00 min	1 h 25 min	0,04	12/42	18/80	26/111	40/190	54/215	62/325
3,0	2,3	5.006	29	1 h 10 min	1 h 30 min	0,04	14/53	19/84	28/116	51/218	52/273	70/365
3,5	2,4	5.039	29	1 h 10 min	1 h 30 min	0,00	16/68	21/90	30/126	47/239	55/280	73/395
4,0	2,6	5.106	29	1 h 20 min	1 h 40 min	0,03	19/74	22/109	32/139	49/240	61/280	78/389
4,5	2,9	5.154	28	1 h 25 min	1 h 45 min	0,04	20/81	23/112	30/145	50/243	52/268	70/375
5,0	3,0	5.219	28	1 h 30 min	1 h 50 min	0,06	21/86	26/117	32/144	53/239	56/274	70/369
5,5	3,3	5.251	28	1 h 30 min	1 h 55 min	0,03	20/95	27/136	33/161	46/241	62/279	68/370
6,0	3,5	5.267	28	1 h 35 min	2 h 10 min	0,04	22/101	30/144	36/162	49/238	57/271	74/396
6,5	3,6	5.298	28	1 h 35 min	2 h 10 min	0,02	22/101	29/142	37/171	52/243	62/275	78/369
7,0	3,7	5.314	28	1 h 40 min	2 h 30 min	0,02	23/105	29/150	36/175	49/237	59/274	70/360

1.3. Comentario parcial

Se observa un aumento en la S.E. Blaine de unas 500 unidades al ir aumentando el contenido de yeso de 1,5 a 7,0 %, tanto si partimos de un clinker molido a 2.500 cm²/g como si es de 4.500 cm²/g; por tanto un aumento en el contenido del yeso puede falsear el concepto de finura del cemento.

De los tiempos de fraguado, se deduce que el contenido en yeso no debe ser inferior al correspondiente de 1,7 % en SO₃, so pena de correr el riesgo de fabricar cementos de fraguados rápidos.

La expansión al autoclave no parece tener relación con el contenido en yeso.

En todos los ensayos hemos trazado líneas verticales indicando el margen en el que se obtienen mejores resistencias, observándose como, a medida que aumenta el tiempo y, por lo general, a partir ya de 3 días, la influencia del porcentaje de yeso no se deja sentir excepto para concentraciones bajas de SO₃, con posibilidad de fraguado rápido.

1.4. Datos alcanzados con el clinker de hornos Lépol

Al igual que anteriormente, en las tablas 1.4.1., 1.4.2. y 1.4.3. se exponen los valores logrados en los distintos ensayos realizados con un promedio de clinker de hornos Lépol.

En las tablas 1.4.4., 1.4.5. y 1.4.6. se detallan los porcentajes de retracción obtenidos al exponer en el aire, a temperatura ambiente, probetas de pasta pura de 25,4 × 25,4 × 287 milímetros desde un día a ocho semanas.

En los gráficos 1.4.1., 1.4.2., 1.4.3. y 1.4.4. se representan los valores obtenidos en los ensayos mecánicos, así como la retracción alcanzada en el aire a las distintas fechas de medición.

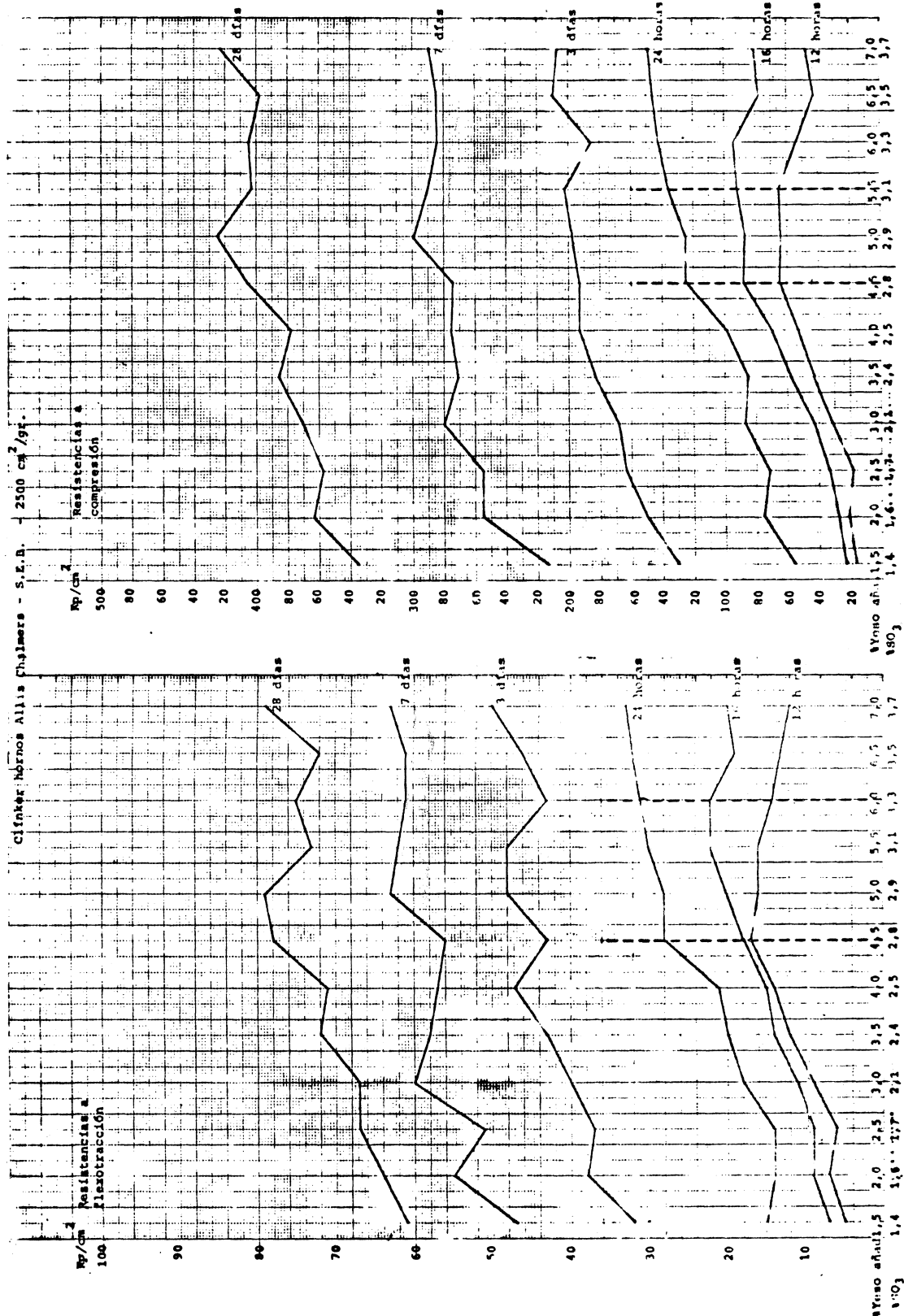


Gráfico 1.2.1.

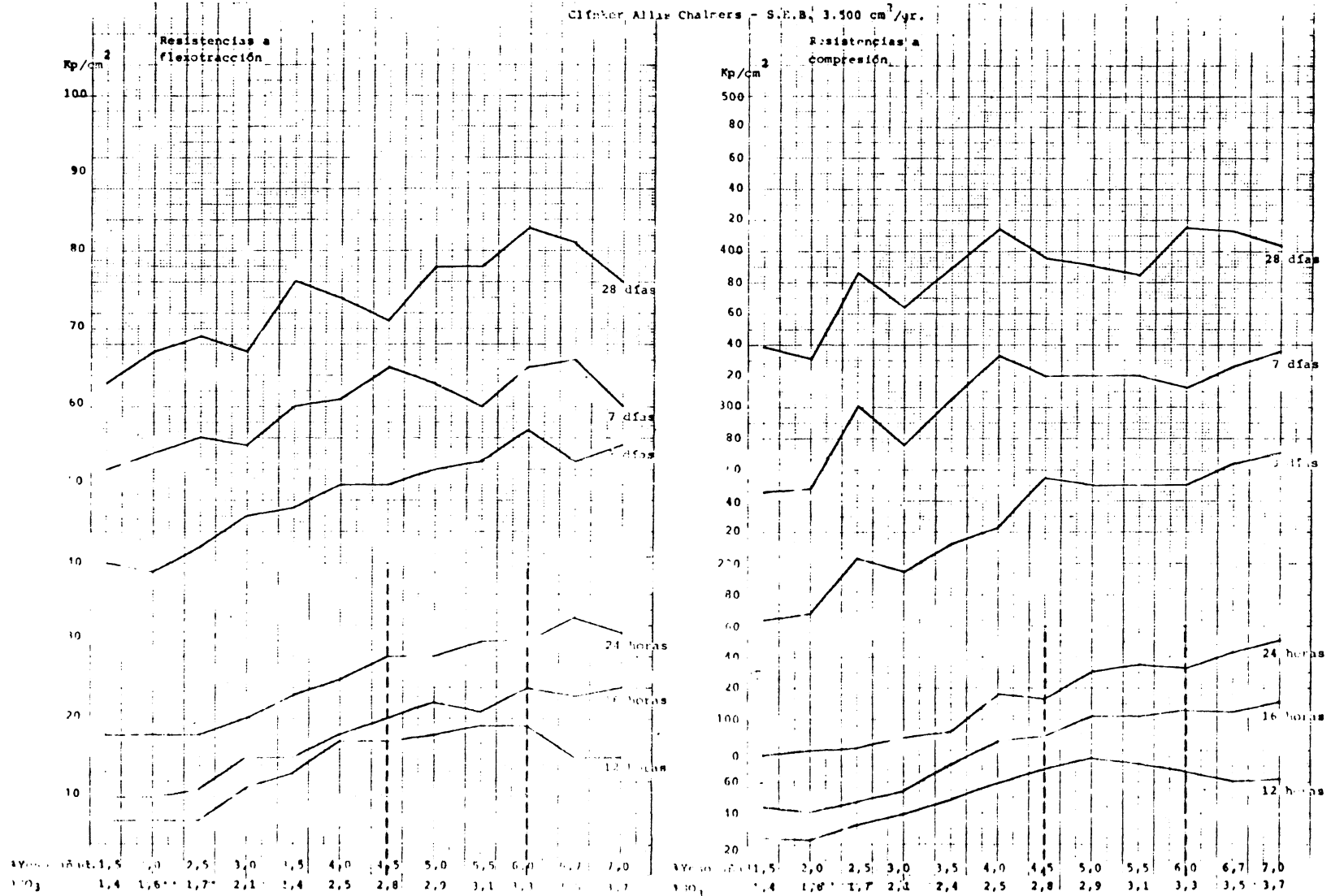


Gráfico 1.2.2.

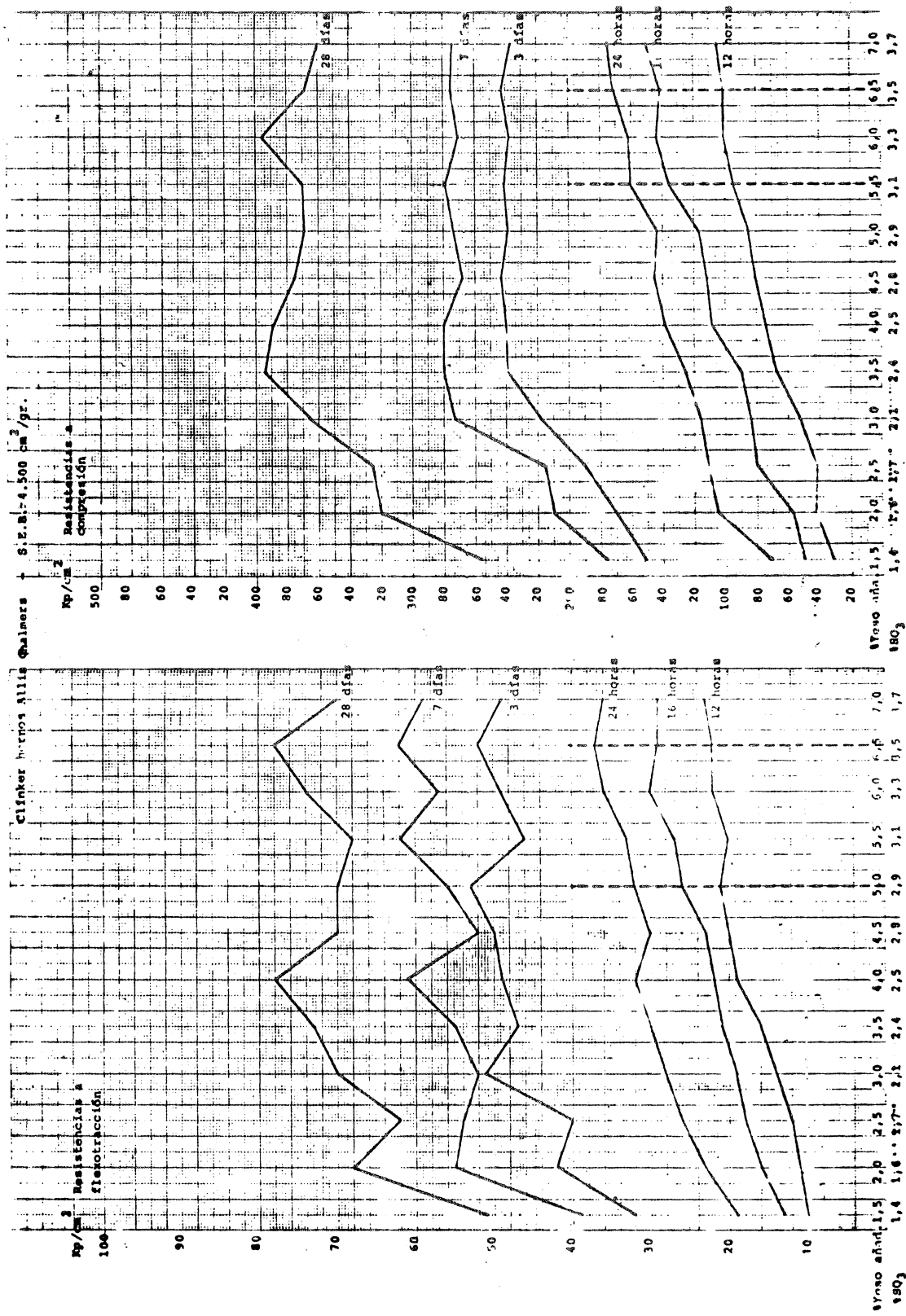


Gráfico 1.2.3.

Las verticales indican los valores considerados como óptimos.

T A B L A 1.4.1.

Clinker Hornos Lépol S.E.B. \approx 2.500

FINURA CLINKER			
900	4.900	10.000	S.E.B.
1,0	6,4	14,0	2.748

% Yeso añadido	% SO ₃ total	S.E.B. cm ² /g	FRAGUADO			% Expans. Autocl.	% Retrac. al aire 56 días	RESISTENCIAS MECANICAS					
			Agua	Inicial	Final			12 h	16 h	24 h	3 días	7 días	28 días
1,5	1,3	2.977	26	1 h 35 min	2 h 20 min	0,10	0,471	7/34	12/50	22/88	52/209	61/288	71/365
2,0	1,5	3.038	26	1 h 45 min	2 h 25 min	0,07	0,378	11/40	15/60	24/98	51/234	69/309	73/418
2,5	1,6	3.034	26	1 h 50 min	2 h 40 min	0,09	0,381	13/50	17/79	26/116	56/231	70/309	75/406
3,0	1,9	3.061	26	1 h 55 min	2 h 45 min	0,08	0,297	17/55	23/102	33/158	58/255	71/339	76/424
3,5	2,2	3.083	26	1 h 55 min	2 h 50 min	0,05	0,293	17/65	24/111	34/168	57/255	72/345	78/411
4,0	2,6	3.173	26	2 h 00 min	3 h 10 min	0,07	0,292	16/61	24/110	36/169	60/275	75/349	80/439
4,5	2,8	3.143	25	2 h 00 min	3 h 00 min	0,09	0,285	16/60	24/111	35/184	63/279	77/346	85/448
5,0	3,0	3.196	25	1 h 55 min	2 h 50 min	0,07	0,292	16/58	23/95	36/188	64/276	79/331	86/438
5,5	3,2	3.197	25	2 h 00 min	3 h 10 min	0,05	0,336	12/52	22/82	36/189	62/281	74/325	79/410
6,0	3,3	3.250	25	2 h 00 min	3 h 10 min	0,04	0,299	13/50	19/73	30/187	58/279	75/339	77/413
6,5	3,5	3.303	25	2 h 00 min	3 h 10 min	0,03	0,387	12/46	19/90	28/158	66/288	79/358	85/450
7,0	3,8	3.378	25	2 h 10 min	3 h 20 min	0,04	0,342	12/46	18/85	27/150	63/282	78/341	84/448

T A B L A 1.4.2.

Clinker Hornos Lépol S.E.B. \approx 3.500

FINURA CLINKER			
900	4.900	10.000	S.E.B.
2,2	6,0	8,0	3.450

% Yeso añadido	% SO ₃ total	S.E.B. cm ² /g	FRAGUADO			% Expans. Autocl.	% Retrac. al aire 56 días	RESISTENCIAS MECANICAS					
			Agua	Inic' al	Final			12 h	16 h	24 h	3 días	7 días	28 días
1,5	1,4	3.476	26	0 h 50 min	1 h 30 min	0,09	0,508	10/40	14/66	23/103	58/243	69/339	78/485
2,0	1,6	3.572	26	1 h 30 min	2 h 10 min	0,10	0,567	13/46	17/75	25/107	62/261	71/333	80/486
2,5	1,8	3.595	26	1 h 30 min	2 h 15 min	0,05	0,478	17/60	21/86	31/121	62/250	70/346	79/475
3,0	2,1	3.665	26	1 h 40 min	2 h 25 min	0,06	0,398	19/72	24/92	34/144	61/270	75/355	80/464
3,5	2,3	3.688	26	1 h 55 min	2 h 35 min	0,07	0,335	22/87	26/121	38/156	64/280	76/366	81/493
4,0	2,6	3.710	26	1 h 55 min	2 h 35 min	0,06	0,350	24/95	32/128	40/171	66/295	77/360	80/463
4,5	2,8	3.733	26	1 h 55 min	2 h 30 min	0,03	0,305	25/95	33/134	41/169	67/290	79/370	82/501
5,0	3,1	3.755	26	1 h 55 min	2 h 30 min	0,08	0,288	25/97	35/145	43/186	67/304	77/363	84/491
5,5	3,3	3.822	26	1 h 55 min	2 h 35 min	0,05	0,297	26/97	34/148	45/217	69/326	81/380	85/478
6,0	3,5	3.843	26	2 h 00 min	2 h 45 min	0,17	0,420	21/85	34/155	45/216	74/336	82/390	86/494
6,5	3,6	3.865	26	2 h 00 min	2 h 45 min	0,03	0,346	20/78	32/148	47/218	71/343	81/385	87/515
7,0	3,9	3.887	26	2 h 00 min	2 h 50 min	0,08	0,383	19/78	29/136	42/206	69/328	77/366	86/503

TABLA 1.4.3.

Clínker Hornos Lépol S.E.B. \approx 4.500

FINURA CLINKER			
900	4.900	10.000	S.E.B.
2,4	6,4	11,0	4 520

% Yeso añadido	% SO ₃ total	S.E.B. cm ² /g	FRAGUADO			% Expans. Autocl.	% Retrac. al aire 56 días	RESISTENCIAS MECANICAS					
			Agua	Inicial	Final			12 h	16 h	24 h	3 días	7 días	28 días
1,5	1,4	4.527	27	0 h 20 min	0 h 30 min	0,08	0,486	9/34	14/59	23/100	52/256	64/325	73/395
2,0	1,6	4.566	27	0 h 35 min	0 h 50 min	0,09	0,447	13/49	20/73	28/113	58/285	71/341	76/455
2,5	1,9	4.620	27	0 h 50 min	1 h 20 min	0,16	0,439	17/63	22/87	33/134	61/264	70/355	73/458
3,0	2,1	4.674	27	1 h 05 min	1 h 50 min	0,11	0,379	20/70	25/97	36/149	63/283	66/361	76/455
3,5	2,4	4.694	27	1 h 10 min	2 h 00 min	0,13	0,343	23/92	30/123	41/163	67/281	74/370	80/449
4,0	2,6	4.746	27	1 h 25 min	2 h 10 min	0,06	0,317	28/111	32/138	43/187	66/294	69/376	75/448
4,5	2,8	4.870	27	1 h 30 min	2 h 15 min	0,04	0,293	29/123	35/142	43/193	62/290	74/370	81/450
5,0	3,0	4.887	27	1 h 40 min	2 h 25 min	0,04	0,314	31/126	37/162	45/202	68/305	72/360	77/448
5,5	3,3	4.892	27	1 h 40 min	2 h 30 min	0,06	0,313	35/151	43/200	53/228	67/316	73/368	84/466
6,0	3,5	4.922	27	1 h 50 min	2 h 35 min	0,04	0,311	33/125	40/190	50/223	70/331	74/374	83/455
6,5	3,6	4.928	27	1 h 55 min	2 h 40 min	0,03	0,344	28/111	39/187	47/218	66/311	70/360	83/455
7,0	3,9	4.956	27	1 h 55 min	2 h 40 min	0,07	0,350	25/93	37/167	48/203	64/309	73/351	81/450

TABLA 1.4.4.

*Clínker Hornos Lépol S. Blaine 2.500 cm²/g
Retracción de pasta pura expuesta al aire a temperatura ambiente*

% Yeso añadido	2 días	3 días	4 días	5 días	6 días	7 días	14 días	21 días	28 días	35 días	42 días	49 días	56 días
1,5	0,085	0,141	0,193	0,211	0,305	0,317	0,331	0,371	0,400	0,436	0,454	0,469	0,471
2,0	0,048	0,110	0,129	0,150	0,223	0,230	0,242	0,271	0,290	0,322	0,343	0,358	0,378
2,5	0,050	0,092	0,121	0,138	0,180	0,185	0,197	0,219	0,249	0,288	0,309	0,325	0,341
3,0	0,046	0,076	0,098	0,112	0,141	0,158	0,183	0,199	0,223	0,252	0,271	0,282	0,297
3,5	0,054	0,087	0,101	0,120	0,161	0,165	0,176	0,200	0,214	0,241	0,261	0,283	0,293
4,0	0,070	0,114	0,122	0,144	0,160	0,168	0,178	0,203	0,221	0,246	0,264	0,279	0,292
4,5	0,076	0,119	0,145	0,147	0,156	0,161	0,165	0,192	0,206	0,233	0,256	0,270	0,285
5,0	0,074	0,128	0,145	0,160	0,164	0,168	0,170	0,194	0,209	0,236	0,262	0,270	0,292
5,5	0,070	0,125	0,154	0,159	0,164	0,169	0,177	0,194	0,212	0,238	0,264	0,270	0,296
6,0	0,079	0,140	0,164	0,170	0,173	0,176	0,180	0,201	0,219	0,240	0,262	0,274	0,299
6,5	0,097	0,157	0,213	0,217	0,222	0,227	0,232	0,250	0,262	0,286	0,307	0,320	0,377
7,0	0,095	0,164	0,213	0,221	0,226	0,231	0,237	0,254	0,258	0,291	0,310	0,324	0,383

TABLA 1.4.5.

*Clínker Hornos Lépol S. Blaine 3.500 cm²/g
Retracción de pasta pura expuesta al aire a temperatura ambiente*

% Yeso añadido	2 días	3 días	4 días	5 días	6 días	7 días	14 días	21 días	28 días	35 días	42 días	49 días	56 días
1,5	0,090	0,132	0,273	0,290	0,301	0,318	0,331	0,373	0,403	0,468	0,483	0,493	0,508
2,0	0,078	0,116	0,216	0,225	0,239	0,249	0,257	0,293	0,325	0,371	0,389	0,437	0,460
2,5	0,076	0,106	0,186	0,192	0,202	0,216	0,222	0,260	0,282	0,332	0,352	0,408	0,430
3,0	0,068	0,089	0,149	0,158	0,168	0,176	0,181	0,218	0,245	0,290	0,311	0,374	0,398
3,5	0,062	0,088	0,140	0,145	0,158	0,166	0,174	0,210	0,227	0,278	0,303	0,315	0,335
4,0	0,074	0,097	0,134	0,140	0,149	0,156	0,163	0,189	0,227	0,266	0,284	0,324	0,350
4,5	0,115	0,136	0,149	0,155	0,157	0,165	0,177	0,202	0,234	0,260	0,271	0,288	0,305
5,0	0,132	0,139	0,150	0,159	0,163	0,169	0,176	0,202	0,228	0,256	0,264	0,279	0,288
5,5	0,145	0,151	0,160	0,169	0,178	0,184	0,188	0,217	0,236	0,262	0,272	0,288	0,297
6,0	0,160	0,166	0,170	0,182	0,187	0,191	0,200	0,232	0,256	0,285	0,293	0,305	0,320
6,5	0,175	0,181	0,191	0,203	0,206	0,211	0,221	0,245	0,268	0,300	0,308	0,326	0,346
7,0	0,215	0,221	0,231	0,235	0,243	0,248	0,253	0,277	0,302	0,334	0,351	0,356	0,383

T A B L A 1.4.6.

Clínker Hornos Lépol S. Blaine 4.500 cm²/g
Retracción de pasta pura expuesta al aire a temperatura ambiente

% Yeso añadido	2 días	3 días	4 días	5 días	6 días	7 días	14 días	21 días	28 días	35 días	42 días	49 días	56 días
1,5	0,080	0,115	0,174	0,208	0,236	0,249	0,263	0,340	0,370	0,443	0,467	0,483	0,487
2,0	0,061	0,107	0,138	0,171	0,199	0,212	0,215	0,312	0,341	0,396	0,424	0,445	0,447
2,5	0,061	0,097	0,137	0,168	0,191	0,206	0,212	0,301	0,325	0,383	0,413	0,435	0,439
3,0	0,054	0,101	0,127	0,154	0,170	0,183	0,191	0,252	0,280	0,337	0,363	0,374	0,379
3,5	0,059	0,089	0,110	0,132	0,147	0,159	0,178	0,228	0,254	0,298	0,323	0,341	0,343
4,0	0,042	0,087	0,103	0,125	0,141	0,150	0,175	0,207	0,232	0,281	0,290	0,304	0,317
4,5	0,058	0,084	0,108	0,121	0,133	0,141	0,175	0,195	0,238	0,264	0,267	0,291	0,293
5,0	0,066	0,090	0,117	0,127	0,136	0,154	0,177	0,209	0,256	0,276	0,285	0,310	0,314
5,5	0,073	0,098	0,119	0,131	0,148	0,153	0,169	0,214	0,257	0,287	0,298	0,311	0,313
6,0	0,051	0,095	0,115	0,131	0,141	0,152	0,204	0,212	0,250	0,285	0,299	0,303	0,311
6,5	0,085	0,113	0,138	0,155	0,159	0,174	0,227	0,246	0,261	0,312	0,328	0,329	0,344
7,0	0,049	0,139	0,147	0,170	0,180	0,190	0,210	0,240	0,303	0,322	0,337	0,346	0,350

1.5. Comentario parcial

Al igual que en los hornos Allis-Chalmers, un aumento en el contenido de yeso eleva los valores de las superficies específicas Blaine.

El fraguado inicial, en ocasiones inferior a los 30 min, hace aconsejable que los cementos fabricados con este clínker tengan un SO₃ mínimo, superior al 1,7 %.

La expansión al autoclave no se ve influenciada por un mayor o menor contenido en yeso; sin embargo la retracción experimentada por las probetas fabricadas con pasta pura, expuestas al ambiente del laboratorio, tienen un mínimo, más o menos amplio, que coincide con las mejores resistencias a corto plazo.

De manera muy similar a los datos alcanzados con el clínker de los hornos Allis-Chalmers, aquí también se detecta la mejora de las resistencias mecánicas a muy corto plazo para determinados márgenes de SO₃, el cual va siendo superior a medida que los cementos son más finos.

En los correspondientes a 2.500 y 3.500 cm²/g no se ve con demasiada claridad el margen de bondad, en parte por los errores propios de los ensayos; sin embargo, en el de 4.500 cm²/g, tanto en flexotracción como en compresión, hay un máximo muy claro, correspondiente a un 3,3 % de SO₃, a partir del cual, lo mismo en un sentido como en otro, los valores logrados son inferiores.

El porcentaje de retracción mínimo también concuerda con este valor, teniendo una amplitud más estrecha que los de finura más grosera.

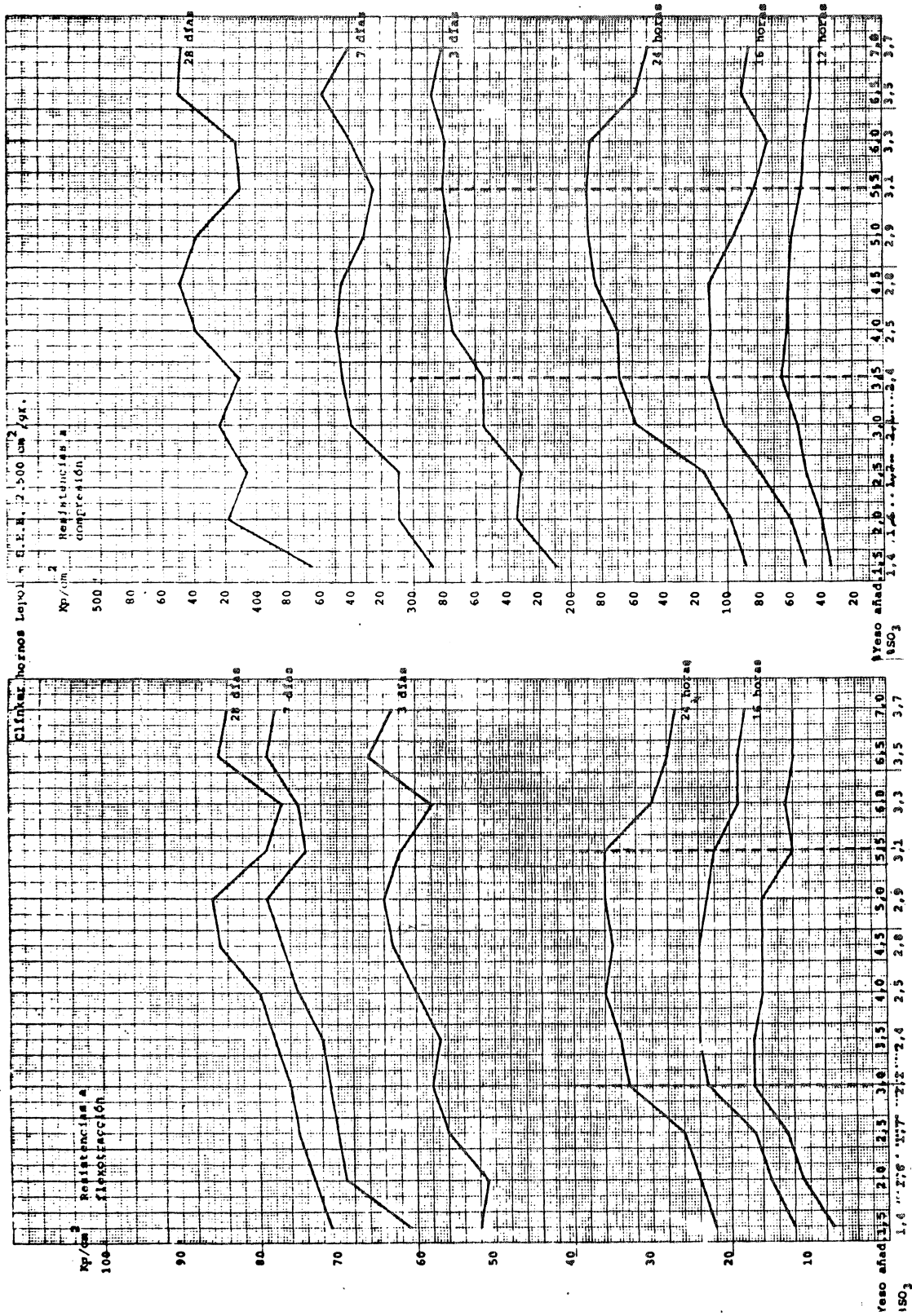


Gráfico 1.4.1.

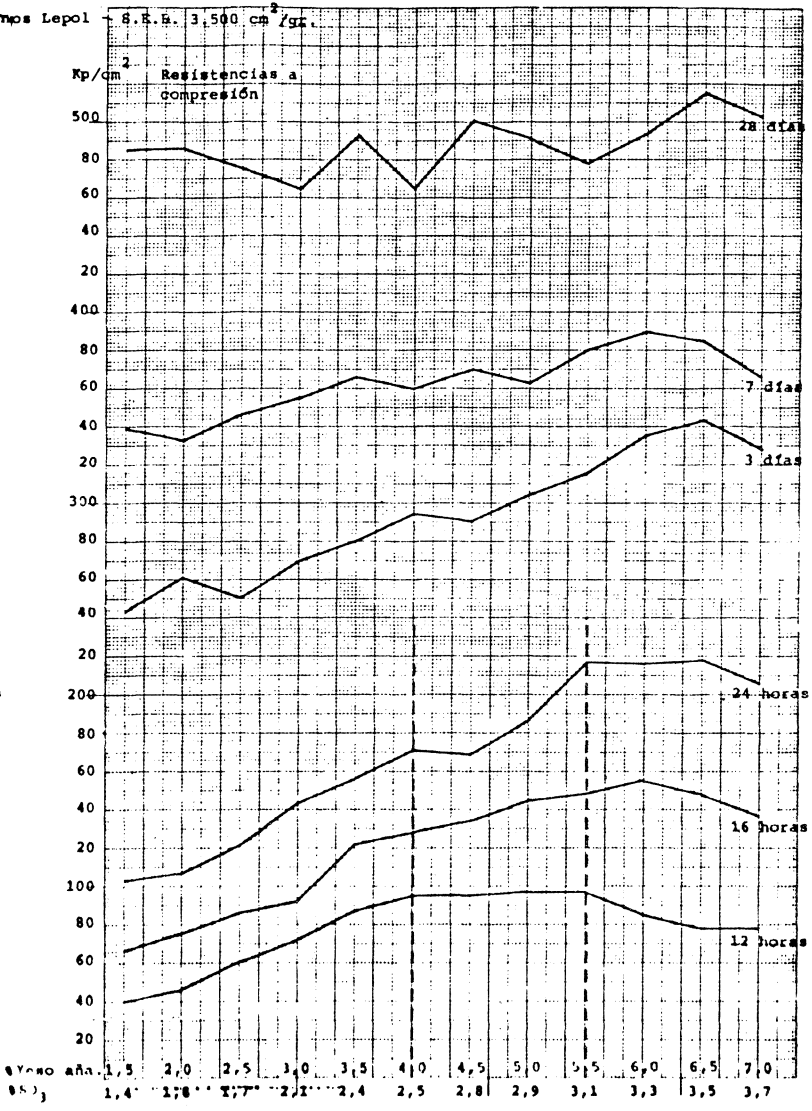
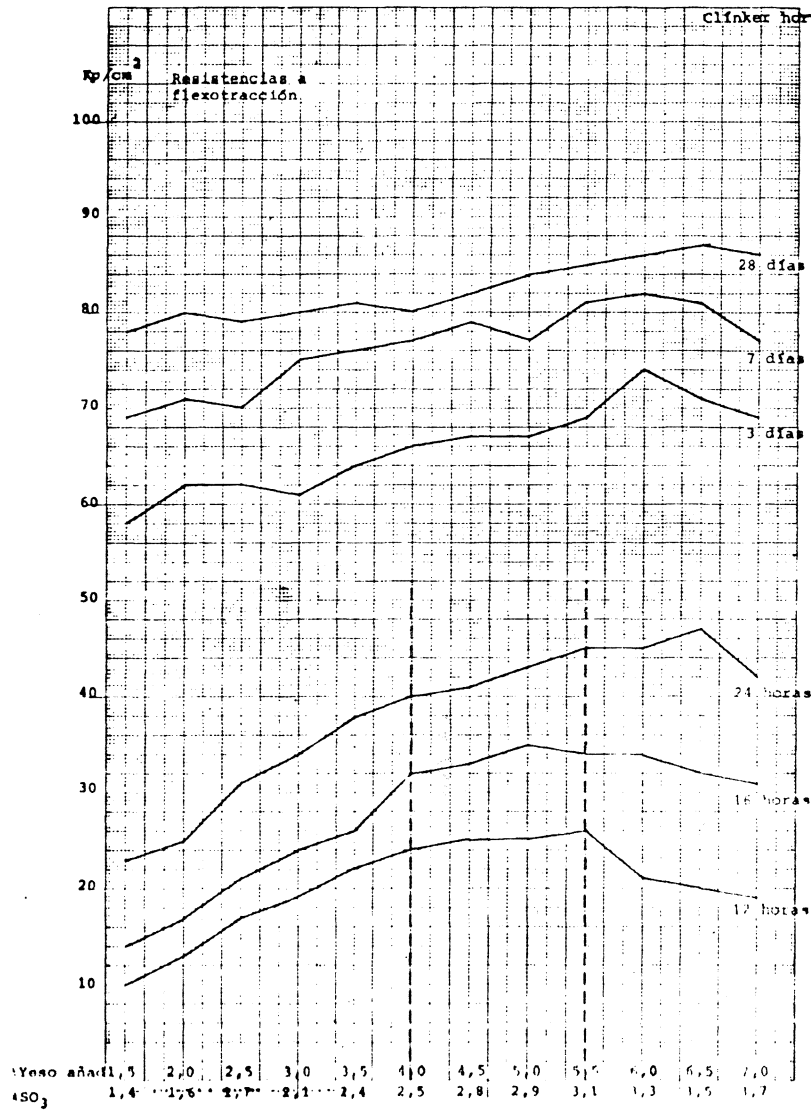


Gráfico 1.4.2.

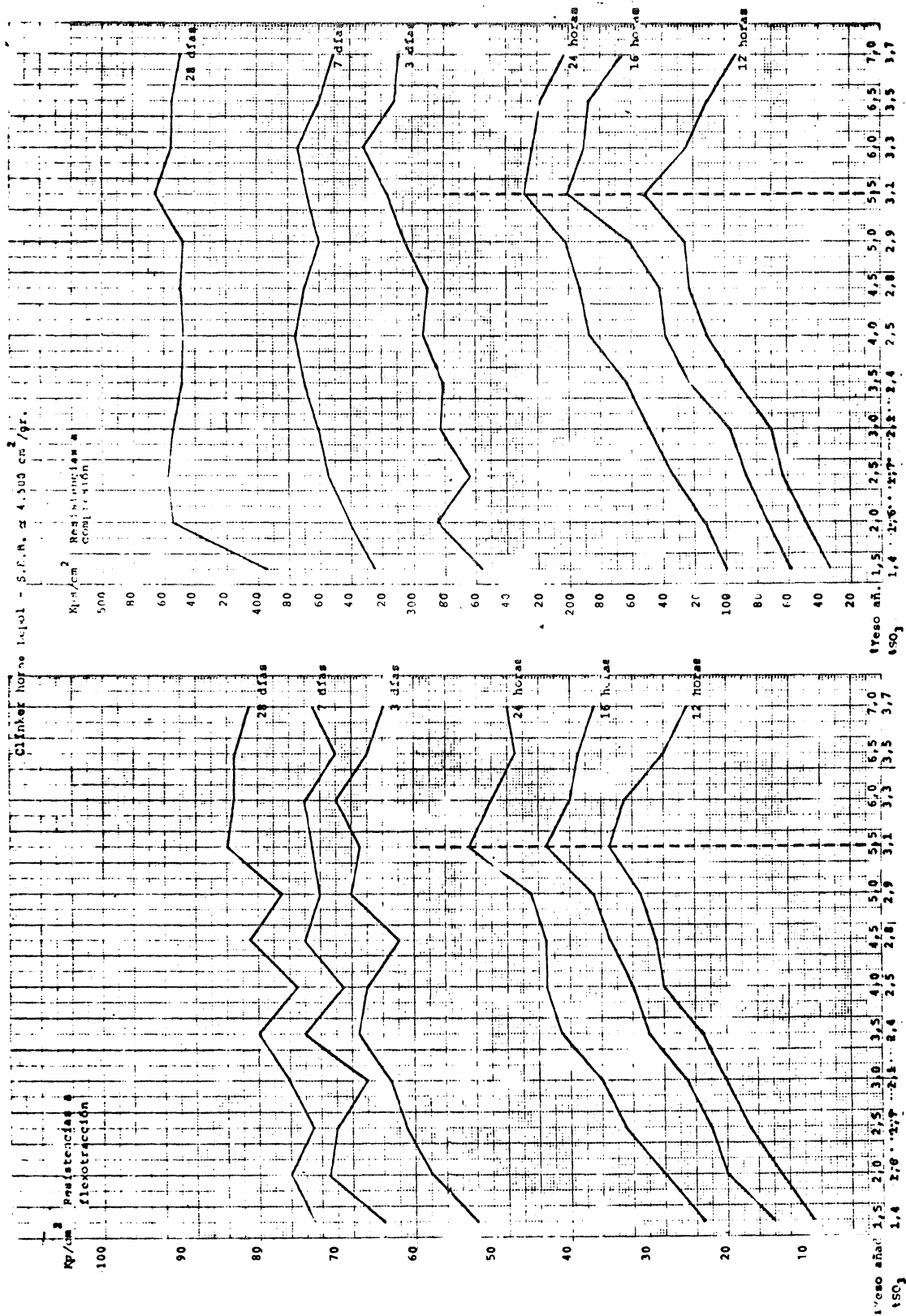


Gráfico 1.4.3.

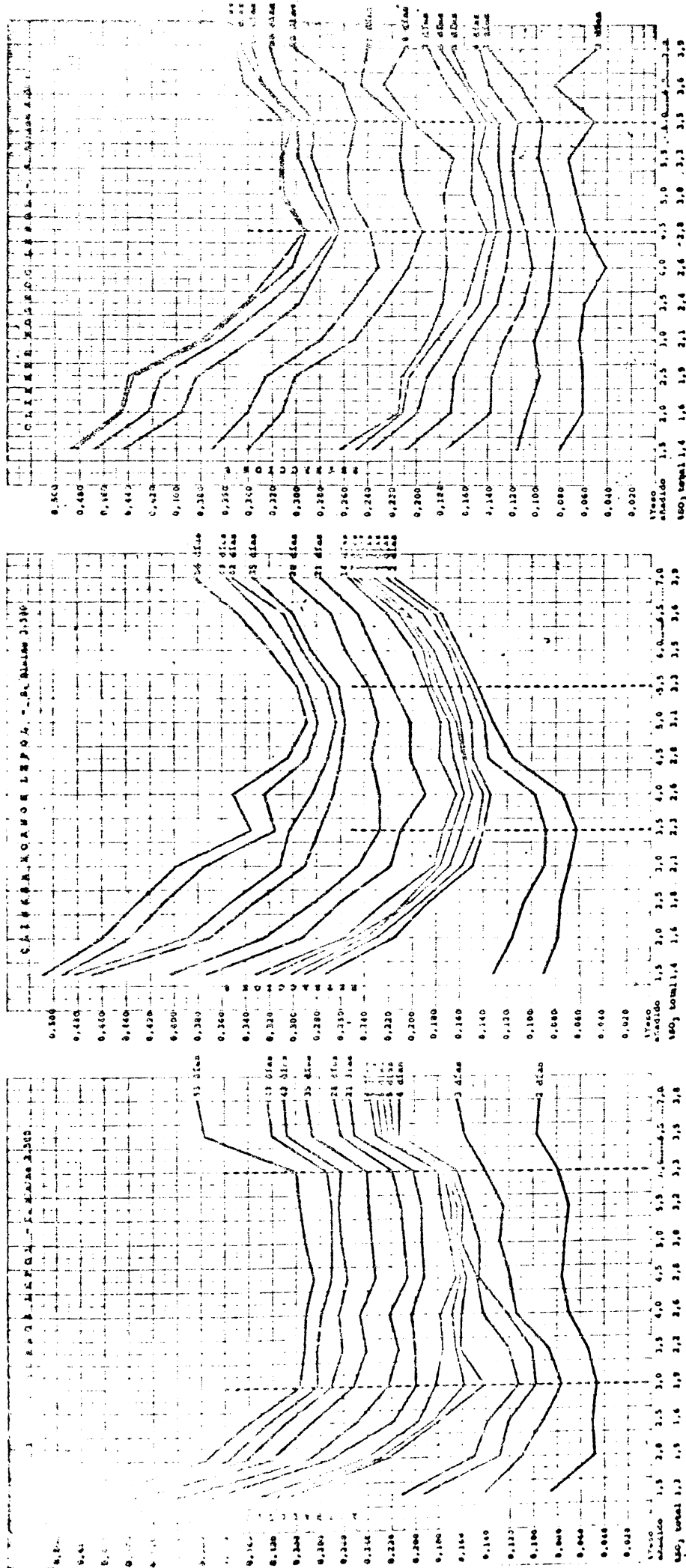


Gráfico 1-4.4.

II. ENSAYO INDUSTRIAL

2. ENSAYO INDUSTRIAL BASADO EN LOS DATOS OBTENIDOS EN EL LABORATORIO

Conocidos los resultados del laboratorio, hemos querido cerciorarnos si efectivamente el cambio del contenido de SO_3 tenía una influencia práctica en la molienda industrial.

En una molienda efectuada en la Fábrica n.º 3, con un molino Allis-Chalmers modificado (Z) de 420 kW para obtener P-450 ARI, se controló hora a hora, a lo largo de todo el día, el contenido de SO_3 , el cual se fue modificando a medida que se tuvo conocimiento del análisis.

Así, en el momento de comenzar la prueba, el SO_3 era de 3,2 %, del cual se pasó en horas sucesivas a: 3,5, 3,6, 3,7, 4,2 y 4,4, para volver finalmente al punto de partida: 3,2 %.

En la tabla adjunta 2.1. se detallan los valores obtenidos, así como el promedio diario ensayado normalmente para el control de fabricación que nos sirve de comparación con las moliendas parciales efectuadas.

En el gráfico 2.1.1. se representan los valores logrados a flexotracción y compresión y se comparan con los valores obtenidos en el promedio de las 24 horas.

TABLA 2.1.

Ensayo industrial en un molino "Allis-Chalmers" (Z) P-450 ARI

	S.E.B.		FRAGUADO			RESISTENCIAS MECANICAS					
	% SO_3	cm^2/g	Agua	Inicial	Final	12 h	16 h	24 h	3 días	7 días	28 días
Promedio 24 h control fábrica	3.5	5.550	30	2 h 00 min	3 h 25 min	—	—	63/311	75/436	87/511	104/604
Promedio 3 h	3.2	5.235	30	2 h 00 min	3 h 25 min	26/122	37/203	61/319	75/500	85/565	102/633
»	3.5	5.515	30	1 h 50 min	3 h 15 min	28/137	39/235	64/337	79/511	83/569	101/631
»	3.6	5.566	31	2 h 00 min	3 h 20 min	26/136	36/219	57/332	73/513	79/554	97/660
»	3.7	5.853	30	2 h 00 min	2 h 40 min	28/126	35/188	53/318	63/506	70/550	94/650
»	4.2	6.039	30	1 h 50 min	2 h 50 min	25/117	31/180	43/283	60/440	70/480	85/556
»	4.4	6.159	30	1 h 50 min	2 h 30 min	24/116	31/179	40/255	55/396	66/435	80/504
»	3.2	5.360	30	1 h 50 min	3 h 20 min	26/123	39/220	63/328	71/510	83/547	91/634
Promedio proporcional a 21 h	3.6	5.675						55/310	63/482	77/529	93/610

2.1. Comentario parcial

Se confirma el aumento de S. E. Blaine con el mayor porcentaje de yeso, llegando en este caso concreto a ser superior a $6.000 \text{ cm}^2/\text{g}$ para un 4,4 % de SO_3 .

Contrariamente a lo que a primera vista pudiera parecer, este elevado Blaine no sólo no origina más altas resistencias, sino que alcanza los valores más bajos a todas las edades.

El valor óptimo está alrededor de 3,5 % de SO_3 , y a medida que aumenta este porcentaje las resistencias descienden bruscamente hasta un mínimo coincidente con el máximo SO_3 antes comentado.

El fraguado parece no tener mucha variación, si bien el final se acorta con porcentajes elevados de yeso.

El promedio de las 24 horas coincide bastante bien con el teórico, proporcional a las 21 horas ensayadas, lo que nos confirma más aún los valores parciales alcanzados.

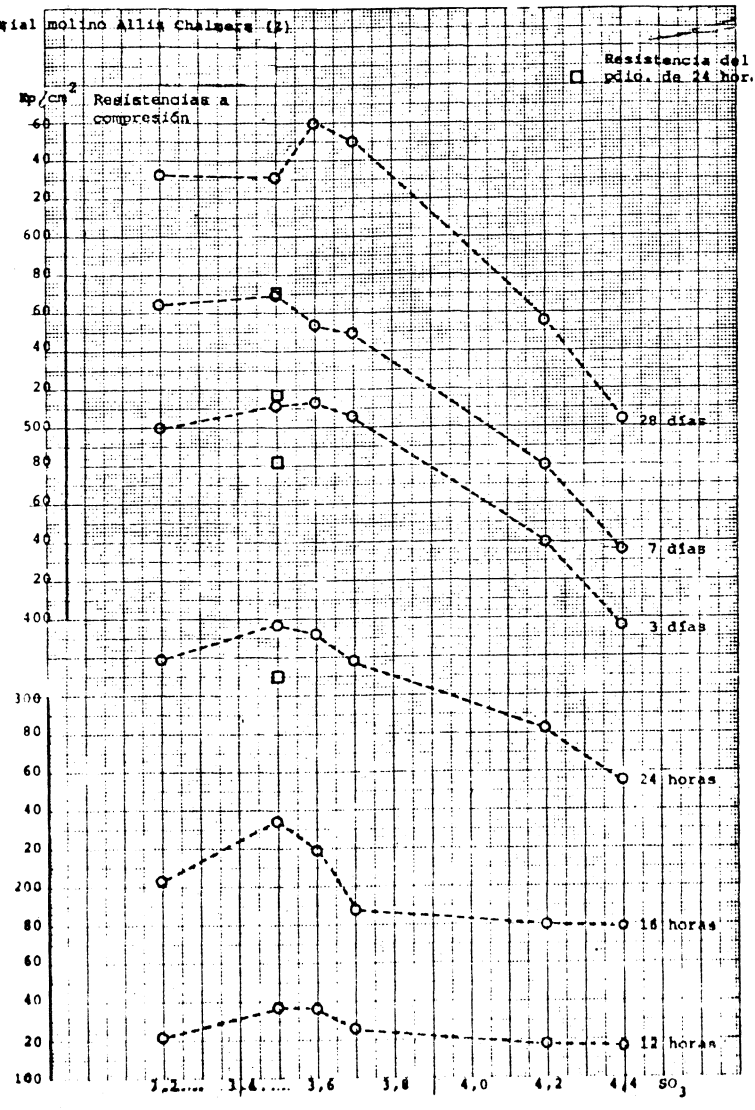
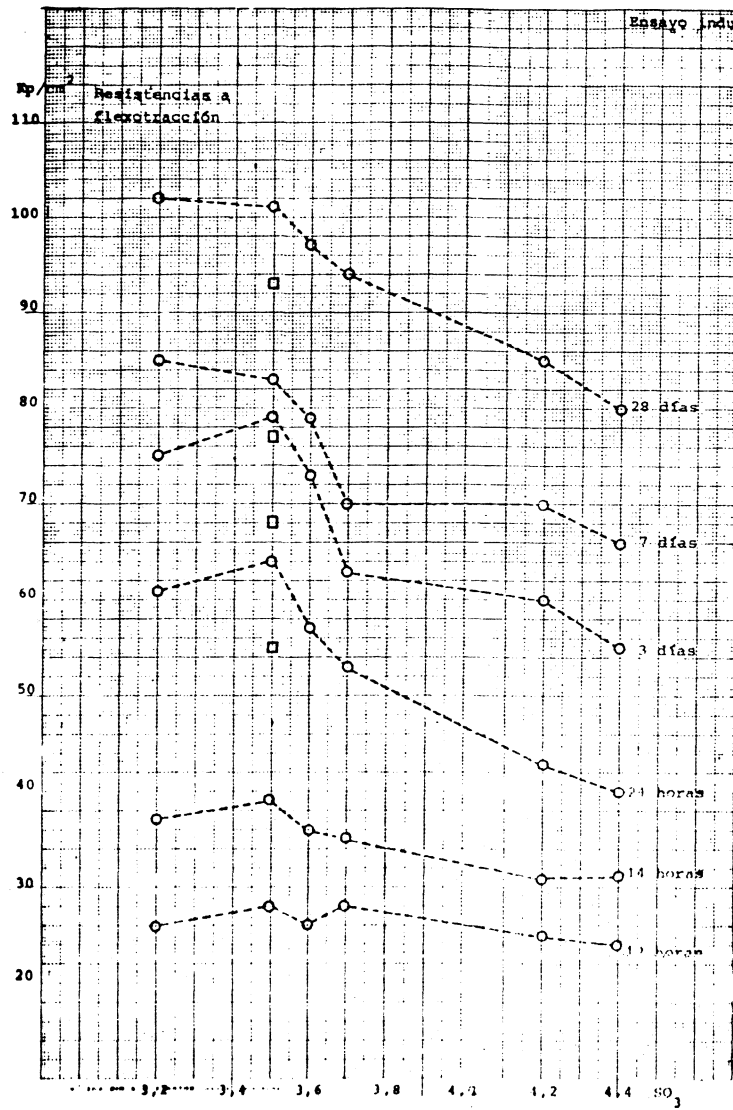


Gráfico 2.1.1.

III. ANALISIS ESTADISTICO

3. ANALISIS ESTADISTICO DE LOS CEMENTOS PRODUCIDOS EN LA FABRICA N.º 3 DURANTE 21 MESES

Se han tomado todas las calidades de cemento producido en estos 21 meses, y en el caso del P-350 y P-450 se dan también los datos correspondientes a los distintos molinos usados para su fabricación. [Allis-Chalmers, Allis-Chalmers modificado (Z) de 420 kW y Polysius de 2.300 kW].

De cada tipo figuran a continuación en las tablas adjuntas el número de datos por intervalo de SO_3 , así como las resistencias medias a 24 horas alcanzadas en cada caso.

En los gráficos que acompañamos se representan los datos anteriores y se limitan con trazos verticales los márgenes de SO_3 , en los cuales se obtienen las máximas resistencias mecánicas a compresión a las 24 horas.

En el caso del P-450 ARI, por considerar que sus resistencias iniciales tienen mayor importancia que en el resto de los cementos, hemos profundizado hasta comprobar las influencias propias del SO_3 , así como las derivadas de la S.E.B.

3.1. Valores obtenidos industrialmente en el P-350

En las tablas y gráficos siguientes se detallan, por tipo de molino, los valores logrados en el P-350:

VARIACION DE LA RESISTENCIA A 24 HORAS CON EL SO_3

TABLA 3.1.1.

P-350 molinos Allis-Chalmers

Intervalo % SO_3	2,0-2,29	2,3-2,59	2,6-2,89	2,9-3,19	3,2-3,49	3,50-3,79
N.º de datos por intervalo	16	48	45	39	44	12
Porcentaje por intervalo	8	23	22	19	22	6
Media por intervalo a 24 h (kp/cm ²)	122	127	129	117	109	105

TABLA 3.1.2.

P-350 molinos Polysius

Intervalo % SO_3	2,0-2,29	2,3-2,59	2,6-2,89	2,9-3,19	3,2-3,49	3,5-3,79	3,8-4,09
N.º de datos por intervalo	5	29	86	111	51	21	6
Porcentaje por intervalo	2	9	27	37	16	7	2
Media por intervalo a 24 h (kp/cm ²)	104	122	113	110	102	99	87

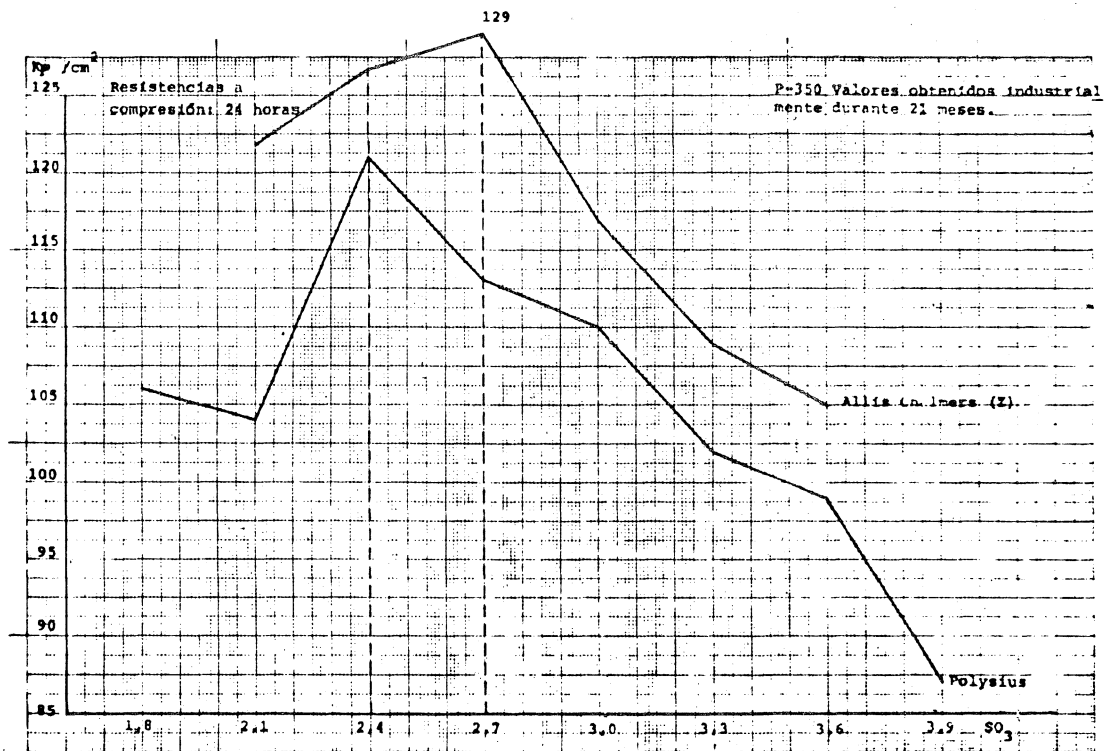


Gráfico 3.1.1.

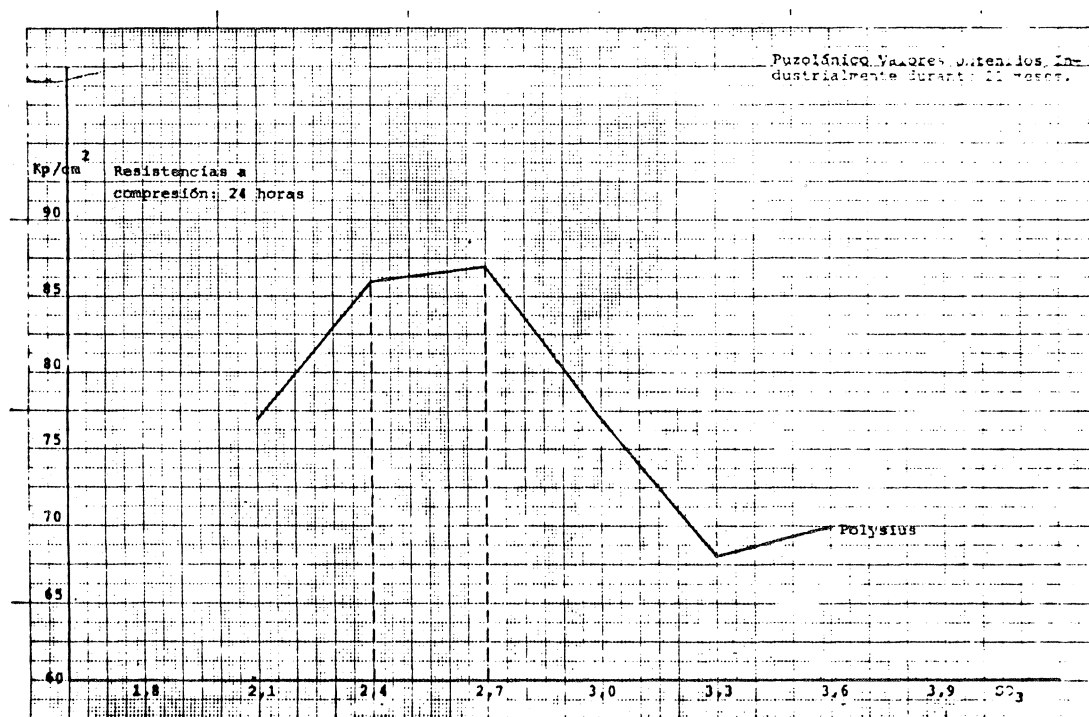


Gráfico 3.2.1.

3.2. Valores obtenidos industrialmente en el Puzolánico

En la tabla y gráfico 3.2.1. se exponen los resultados obtenidos en el cemento puzolánico con porcentajes de SO_3 que van de 2,0 a 3,8:

TABLA 3.2.1.
Cemento puzolánico molinos Polysius

Intervalo % SO_3	2,0-2,29	2,3-2,59	2,6-2,89	2,9-3,19	3,2-3,49	3,5-3,79
N.º de datos por intervalo	7	12	67	64	35	8
Porcentaje por intervalo	4	6	35	33	18	4
Media por intervalo a 24 h (kp/cm ²)	77	86	87	77	68	70

3.3. Valores obtenidos industrialmente en el P-450

Al igual que en el P-350 en las tablas 3.3.1. y 3.3.2., presentamos los resultados alcanzados para la calidad P-450 separándolos por el tipo de molino utilizado en su fabricación.

En el gráfico 3.3.1. figuran estos datos:

TABLA 3.3.1.
Cemento P-450 Allis-Chalmers (Z)

Intervalo % SO_3	2,2-2,59	2,6-2,89	2,9-3,19	3,2-3,49	3,5-3,79	3,8-4,09
N.º de datos por intervalo	6	18	22	41	29	24
Porcentaje por intervalo	4	13	16	29	21	17
Media por intervalo a 24 h (kp/cm ²)	164	174	176	180	162	145

TABLA 3.3.2.
Cemento P-450 Polysius

Intervalo % SO_3	2,0-2,29	2,3-2,59	2,6-2,89	2,9-3,19	3,2-3,49
N.º de datos por intervalo	21	50	95	61	29
Porcentaje por intervalo	8	20	37	24	11
Media por intervalo a 24 h (kp/cm ²)	160	163	166	171	161

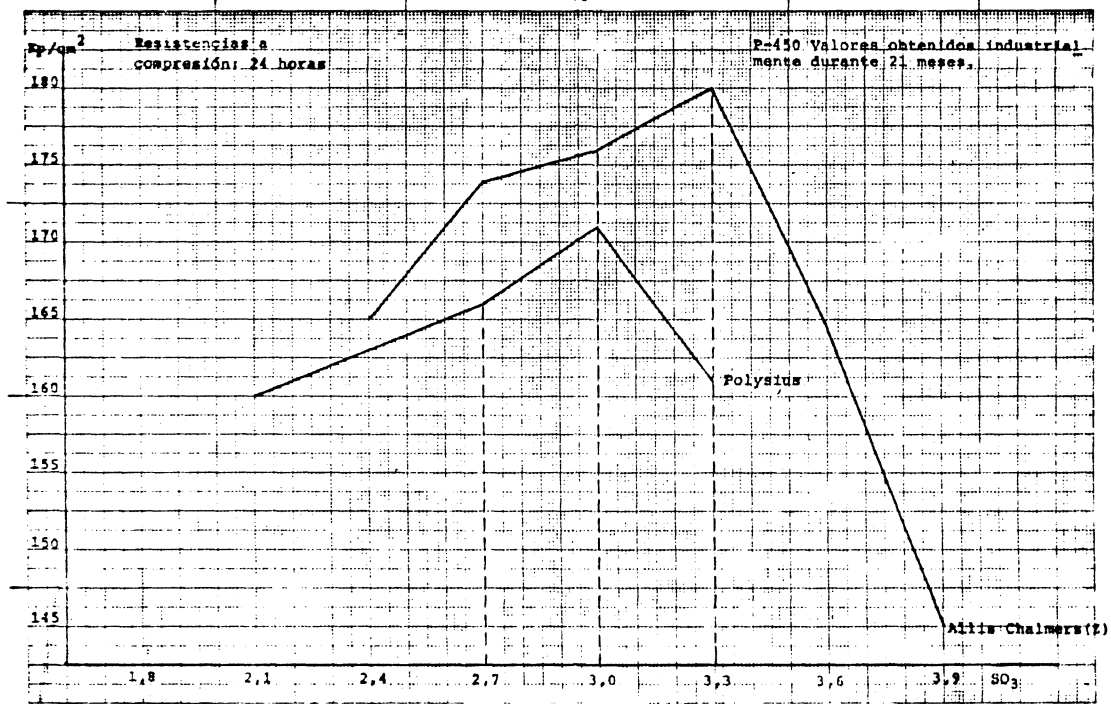


Gráfico 3.3.1.

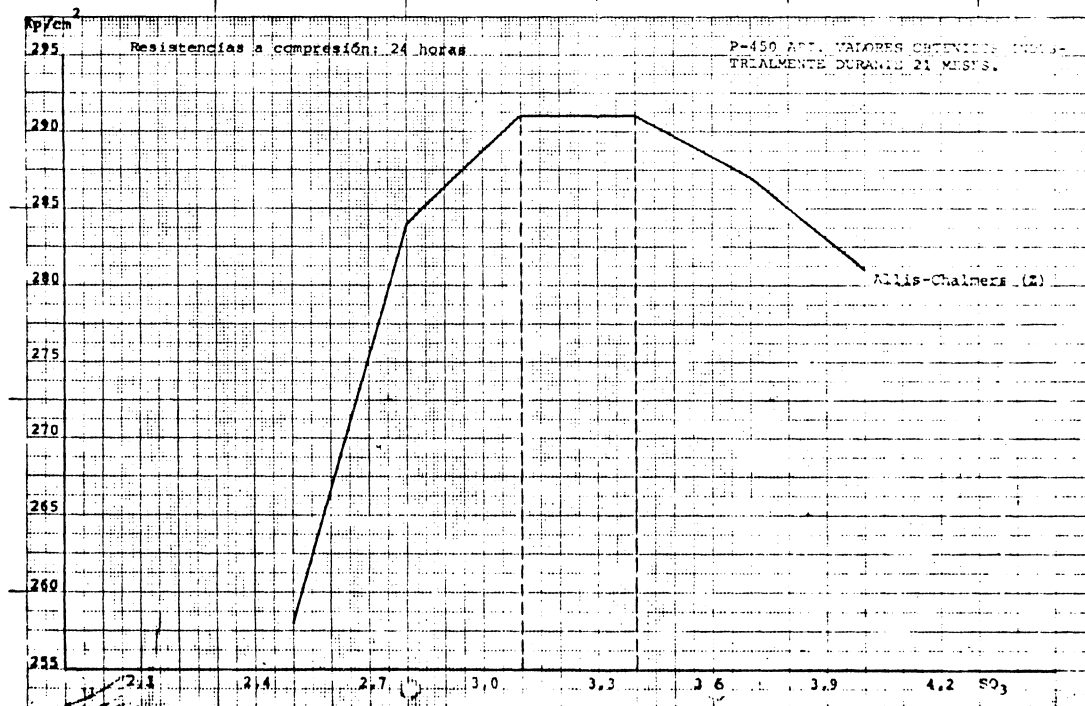


Gráfico 3.4.1.

3.4. Valores obtenidos industrialmente en el P-450 ARI

En la tabla 3.4.1. se exponen los datos correspondientes al P-450 ARI, y en el gráfico 3.4.1. se representan dichos valores logrados en 21 meses de fabricación:

TABLA 3.4.1.
Cemento P-450 ARI Allis-Chalmers (Z)

Intervalo % SO ₃	2,4-2,69	2,7-2,99	3,0-3,29	3,3-3,59	3,6-3,89	3,9-4,19
N.º de datos por intervalo	13	64	81	49	39	19
Porcentaje por intervalo	5	24	31	18	15	7
Media por intervalo a 24 h (kp/cm ²)	258	284	291	291	287	281

Para profundizar más en el exacto valor de estos datos debemos, en primer lugar, saber si siguen una curva gaussiana y, para ello, hemos hecho uso del ensayo de PEARSON, el cual exige para que una curva resulte normal se cumpla que

$$\chi^2 = \frac{\sum (N_i - N P_i)^2}{N P_i}$$

sea menor al χ^2 teórico determinado por PEARSON (ver tabla de PEARSON), siendo N_i la frecuencia observada; P_i la probabilidad teórica correspondiente a la ley de LAPLACE-GAUSS y N el total de observaciones.

χ^2 de Pearson

Número de grados de libertad	1	2	3	4	5	6	7
Valor de χ^2 (umbral de 0,05)	3,84	5,99	7,81	9,49	11,07	12,59	14,07
Número de grados de libertad	8	9	10	15	20	25	30
Valor de χ^2 (umbral de 0,05)	15,51	16,92	18,31	25,00	31,41	37,65	43,77

TABLA 3.4.2.

Intervalo (kp/cm ²)	Valores centrales X_i	Número de observaciones N_i	Porcentaje intervalo	$Z = (X_i - \bar{X})/S$	Probabilidades parciales teóricas $F(Z)$	Frecuencia teórica $N P_i$	X	
200-219,9	210	3	1	3,07	0,006	1,28	2,3	
220-239,9	230	10	4	2,26	0,033	7,07	1,2	
240-259,9	250	24	9	1,45	0,140	30,03	1,2	
260-279,9	270	60	22	0,65	0,317	67,99	0,9	
280-299,9	290	79	30	0,16	0,394	84,51	0,3	
300-319,9	310	68	26	0,97	0,249	53,41	2,9	
320-339,9	330	21	8	1,78	0,085	18,23	0,4	
		N = 265					$\chi^2 = 9,2$	

$$\bar{X} = 286,2 \text{ kp/cm}^2$$

$$e = 20 \text{ kp/cm}^2$$

$$S = 24,7 \text{ kp/cm}^2$$

$$N.º \text{ grados de libertad} = 7 - 3 = 4$$

$$\chi^2 \text{ (PEARSON)} = 9,5$$

$$\chi^2 \text{ (Calculado)} = 9,2 < 9,5 = \chi^2 \text{ (teórico de Pearson)}$$

De donde deducimos que, efectivamente, los datos con los que trabajamos están agrupados según una curva de GAUSS.

Una vez aclarado este punto trataremos de comprobar por el ensayo de FISHER-SNEDECOR si las resistencias medias por intervalo a 24 horas se hallan efectivamente influenciadas por el porcentaje de SO₃, o bien si las diferencias encontradas se deben al azar o a otros factores no estudiados aquí:

Tabla de distribución del "F" de FISHER-SNEDECOR

n	Umbral	1		2		3		4		5		6		8		12		∞	
		0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01	0,05	0,01
1	161	4.052	199	4.999	216	5.403	225	5.625	230	5.764	234	5.859	239	5.981	244	6.106	254	6.366	
2	18,51	98,5	19,00	99	19,16	99,17	19,25	99,3	19,3	99,3	19,33	99,3	19,37	99,4	19,41	99,4	19,5	99,5	
3	10,13	34,12	9,55	30,81	9,28	29,46	9,12	28,71	9,01	28,24	8,94	27,91	8,84	27,5	8,74	27,05	8,53	26,1	
4	7,71	21,20	6,94	18,00	6,59	16,69	6,39	15,98	6,26	15,52	6,16	15,21	6,04	14,80	5,91	14,37	5,63	13,46	
5	6,61	16,26	5,76	13,27	5,41	12,06	5,19	11,39	5,05	10,97	4,95	10,67	4,82	10,27	4,68	9,89	4,35	9,02	
6	5,99	13,74	5,14	10,91	4,76	9,78	4,53	9,15	4,39	8,75	4,28	8,47	4,15	8,10	4,00	7,72	3,67	6,88	
7	5,59	12,25	4,74	9,55	4,35	8,45	4,12	7,85	3,97	7,45	3,87	7,19	3,73	6,84	3,57	6,47	3,23	5,65	
8	5,32	11,26	4,46	8,65	4,07	7,59	3,84	7,01	3,69	6,63	3,58	6,37	3,44	6,03	3,28	5,67	2,93	4,86	
9	5,12	10,56	4,26	8,02	3,86	6,99	3,63	6,42	3,48	6,06	3,37	5,80	3,23	5,47	3,07	5,11	2,71	4,31	
10	4,96	10,04	4,10	7,56	3,78	6,55	3,48	5,99	3,33	5,64	3,22	5,39	3,07	5,06	2,91	4,71	2,54	3,91	
15	4,54	8,68	3,68	6,36	3,29	5,42	3,06	4,89	2,90	4,56	2,79	4,32	2,64	4,00	2,48	3,67	2,07	2,87	
20	4,35	8,10	3,49	5,85	3,10	4,94	2,87	4,43	2,71	4,10	2,60	3,87	2,45	3,56	2,28	3,23	1,84	2,42	
25	4,24	7,77	3,38	5,57	2,99	4,68	2,76	4,18	2,60	3,86	2,49	3,63	2,34	3,32	2,16	2,99	1,71	2,17	
30	4,17	7,56	3,32	5,39	2,92	4,51	2,69	4,02	2,53	3,70	2,42	3,47	2,27	3,17	2,09	2,84	1,62	2,01	
40	4,08	7,31	3,23	5,18	2,84	4,31	2,61	3,83	2,45	3,51	2,34	3,29	2,18	2,99	2,00	2,66	1,51	1,80	
60	4,00	7,08	3,15	4,98	2,76	4,13	2,52	3,65	2,37	3,34	2,25	3,12	2,10	2,81	1,92	2,50	1,39	1,60	
∞	3,84	6,64	2,99	4,6	2,60	3,78	2,37	3,32	2,21	3,02	2,09	2,80	1,94	2,51	1,75	2,18	1,00	1,00	

En la tabla adjunta detallamos los pasos seguidos para la aclaración de este punto:

TABLE 3.4.3.

Intervalo % SO ₃	N.º datos intervalo	Porcentaje intervalo	Media por intervalo X _i	(X _i - X)²	N _i (X _i - X)²	(X _{ij} - X _i)²
2,40-2,69	13	5	258	795,2	10.337,6	10.184
2,70-2,99	64	24	284	4,8	307,2	32.123
3,00-3,29	81	31	291	27,0	2.187,0	50.697
3,30-3,59	49	18	291	27,0	1.323,0	44.829
3,60-3,89	39	15	287	1,4	54,6	15.754
3,90-4,19	19	7	281	27,0	513,0	12.870
N = 265					14.722,4	166.457

$$\bar{X} = 286,2$$

$$s^2 = \frac{14.722,4}{6 - 1} = 2.944,5$$

$$S^2 = \frac{166.457}{265 - 6} = 642,7$$

$$F' = \frac{s^2}{S^2} = \frac{2.944,5}{642,7} = 4,58$$

"F" = 2,21 (Tabla de distribución de Fisher-Snedecor)

$$F' = 4,58 > 2,21 = "F" \text{ (Fisher Snedecor) (0,05)}$$

Lo cual es lo mismo que decir que los intervalos de SO_3 antes mencionados ejercen una influencia profunda en la obtención de resistencias mecánicas a 24 horas en el P-450 ARI, existiendo un 95 % de posibilidades de que estas conclusiones sean ciertas.

De idéntica forma tratamos de comprobar la influencia de la S. E. Blaine en las resistencias a 24 horas del P-450 ARI y, por ello, hemos agrupado de nuevo los datos obtenidos industrialmente a lo largo de los 21 meses estudiados, en intervalos de 300 cm^2/g .

Los datos se detallan en la siguiente tabla:

T A B L A 3.4.4.

Intervalo S.E.B.	N.º datos intervalo N_i	Porcentaje intervalo	Media por intervalo \bar{X}_i	$(\bar{X}_i - \bar{X})^2$	$N_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2$	$(X_{ij} - \bar{X}_i)^2$
3.900-4.199	13	4,9	268	338,6	4.401,8	12.940
4.200-4.499	15	5,7	277	88,4	1.326,0	12.302
4.500-4.799	40	15,2	279	54,8	2.192,0	33.189
4.800-5.099	67	25,5	288	2,6	174,2	38.349
5.100-5.399	89	33,9	288	2,6	231,4	45.029
5.400-5.699	31	11,8	296	92,2	2.858,2	9.250
5.700-6.000	8	3,0	301	213,2	1.705,6	1.746
	$N = 263$				12.889,2	152.805

$$\bar{X} = 286,4 \quad s^2 = \frac{12.889,2}{7 - 1} = 2.148,2 \quad S^2 = \frac{152.805}{263 - 7} = 596,8$$

$$F'' = \frac{s^2}{S^2} = \frac{2.148,2}{596,8} = 3,60$$

$$F'' = 3,60 > 2,80 = "F" \text{ (Fisher-Snedecor) (0,01)}$$

Lo cual, vista la amplitud tan grande existente en la S.E.B. (3.900-6.000), no es extraño y nos confirma la tesis por todos sabida de la influencia que ejerce la S. E. Blaine en las resistencias.

No obstante, se observa que no es normal la fabricación de P-450 ARI con S. E. Blaine de 3.900 a 4.500, por un lado, y las superiores a 5.700, por otro, como lo demuestra que el 87 % de las muestras se encuentre entre 4.500 y 5.700 cm^2/g .

Tomando esta fracción como característica del cemento fabricado en la Fábrica n.º 3 para la calidad P-450 ARI, a ella nos referiremos para conocer la verdadera influencia de la superficie específica en las resistencias a corto plazo en el campo en que suele moverse para este tipo de cemento:

TABLA 3.4.5.

Intervalo S.E.B.	N.º datos intervalo N_i	Porcentaje intervalo	Media por intervalo \bar{X}_i	$(\bar{X}_i - \bar{X})^2$	$N_i (\bar{X}_i - \bar{X})^2$	$(X_{ij} - \bar{X}_i)^2$
4.500-4.799	40	17,6	279	72,25	2.890,00	33.189
4.800-5.099	67	29,5	288	0,25	16,75	38.349
5.100-5.399	89	39,2	288	0,25	22,25	45.029
5.400-5.700	31	13,7	296	72,25	2.239,75	9.250
	$N = 227$				5.168,75	125.817

$$\bar{X} = 287,5 \quad s^2 = \frac{5.168,75}{4 - 1} = 1.722,9 \quad S^2 = \frac{125.817}{227 - 4} = 564,2$$

$$F' = \frac{s^2}{S^2} = \frac{1.722,9}{564,2} = 3,05$$

$$F' = 3,05 > 2,60 = "F" \text{ (Fisher-Snedecor) (0,05)}$$

Esto es, para intervalos de 300 cm²/g, en los límites arriba citados, la S.E.B. influye en las resistencias a 24 horas del P-450 ARI, con un grado de probabilidad de que esto sea cierto, idéntico al alcanzado con la relación SO₃/24 horas.

3.5. Conclusiones parciales

Existe una buena concordancia entre los datos obtenidos en el laboratorio y los obtenidos estadísticamente de los controles de fabricación, como se demuestra en la siguiente tabla:

TABLA 3.5.1.
Valores óptimos de SO₃

Calidad	Resultados obtenidos en el laboratorio		Resultados estadísticos de molinados industriales (21 meses)
	Hornos Allis-Chalmers	Hornos Lépol	
2.500 cm ² /g	2,8-3,1	2,2-3,2	—
P-350 Allis-Chalmers	—	—	2,4-2,7
P-350 Polysius	—	—	2,4-2,7
Puzolánico Polysius	—	—	2,4-2,7
3.500 cm ² /g	2,6-3,3	2,6-3,3	—
P-450-Allis-Chalmers (Z)	—	—	3,0-3,3
P-450 Polysius	—	—	2,7-3,0
4.500 cm ² /g	3,3-3,6	3,3	—
P-450 ARI Allis-Chalmers (Z)	—	—	3,1-3,4

El ensayo de FISHER-SNEDECOR nos confirma la validez de la influencia del SO_3 en las resistencias iniciales, así como la S.E.B. en intervalos de $300 \text{ cm}^2/\text{g}$, aunque en límites estrechos esta variación sea mínima, como lo demuestra que cerca del 60 % de las muestras estudiadas, con superficies que van desde 4.800 a 5.400, presenten idéntica resistencia media de $288 \text{ kp}/\text{cm}^2$, al plazo de 24 horas.

Sin embargo, para márgenes más amplios, su influencia es considerable, como se observa en la tabla 3.4.4.

En todas las calidades queda bien patente que a ambos lados de la zona "crítica" las resistencias disminuyen, siendo, en ocasiones, este descenso mucho más brusco, con porcentajes altos en SO_3 , cercanos al 4 %.

CONCLUSIONES GENERALES

1.^a Del presente estudio se deduce que cada tipo de cemento, molido a diferente superficie específica, tiene un contenido óptimo de adición de yeso para la obtención de las máximas resistencias mecánicas iniciales.

2.^a Para los tipos de cemento estudiados, las resistencias iniciales más altas, así como las retracciones mínimas medidas en la pasta pura, se obtienen en unas zonas óptimas de SO_3 total comprendidas entre:

2,4 a 2,7 % (P-350 y Puzolánico).

2,9 a 3,3 % (P-450).

3,1 a 3,4 % (P-450 ARI).

Naturalmente, los extremos de estas zonas serán los más adecuados para épocas de frío y calor.

3.^a Existe un mínimo de SO_3 , cercano al 1,7 %, al cual por ningún motivo hay que llegar, a menos de correr el riesgo de fabricar cemento rápido.

BIBLIOGRAFIA

- (1) BOGUE, R. H.: La química del cemento portland. 1952.
- (2) TAYLOR, H. F. W.: The chemistry of cements. 1964.
- (3) FRITZ KEIL.: Cemento. 1973.
- (4) TENOUTASSE, N.: Influence du gypse sur l'hydratation de la phase ferrite des ciments portland. Revue des Matériaux de Construction núms. 604 y 614.

- (5) JOISEL, A.: Prise et fausse-prise des ciments. *Revue des Matériaux de Construction*, núm. 649.
- (6) JOLIBOIS, P. et NICOL, A.: L'influence de la presence du sulfate de calcium sur la prise et la résistance des ciments silicates. Extrait de la *Revue des Matériaux de Construction*. Publication technique número 4. Cerilh.
- (7) JASPERS, M. J. M.: Recherche, controle et statistique en cimenterie. *Revue des Matériaux de Construction*, núm. 624.
- (8) LOCHER, F. W.: Erstarren und anfangsfestigkeit von zement. *Zement-Kalk-Gips*, febrero 1973.
- (9) SCHWIETE, H. E. y LUDWIG, J.: Sobre el empleo de distintos compuestos sulfatados en la fabricación de cemento. IV Asamblea general de la eurogypsum. Madrid 1964.
- (10) CALLEJA, J.: Puntos de vista sobre el contenido de yeso de los cementos portland. *Ultimos Avances* 611-67, núm. 120, págs. 41-49. 1965.
- (11) MARGARIT, A. y PUIG, M.: Influencia de la presencia del sulfato cálcico sobre el fraguado del cemento. Monografía núm. 220, IETec. 1962.
- (12) BUDNIKOV, P. P.: Role of gypsum in the hardening of hidraulic cements. Paper IV SI. IV International symposium on the chemistry of cement. Washington. 1960.
- (13) COPELAND, L. E. y KANTRO, D. L.: Hydration of portland cement. V International symposium on the chemistry of cement. Tokio, 1968.
- (14) LOCHER, F. W. y RICHARTZ, W.: Study on the hydration mechanism of cement. The VI International congress on the chemistry of cement. Moscou. 1974.
- (15) LERCH, W.: The Influence of gypsum on the hidration and properties of portland cement pastes. *A. M. Soc. testing mater., proc.* 46, 1.252-1.292 (1946).