

Cementos que contienen 20 y 30 por ciento de cenizas volantes de Puentes de García Rodríguez y de Ponferrada

MARIA JESUS SANTOS CASTRO

NOTA PREVIA

La Dirección Técnica de "CEMENTOS NOROESTE, S. A." que se ocupa del estudio de los materiales y de los procesos desea agradecer públicamente al Prof. Dr. José CALLEJA, del IETCC, la valiosa colaboración y ayuda que a lo largo de bastantes años, desde 1973, viene prestando asiduamente en los trabajos de investigación sobre cementos con cenizas volantes, los cuales se llevan a cabo a partir de dicha fecha en la fábrica de OURAL (Lugo), así como en las publicaciones a las que estos trabajos van dando lugar. En particular, la autora de la presente comunicación hace constar su reconocimiento al Prof. CALLEJA por sus consejos y orientaciones para la misma

INTRODUCCION

En las proximidades de nuestra factoría de Oural, dos centrales térmicas producen importantes cantidades de cenizas volantes.

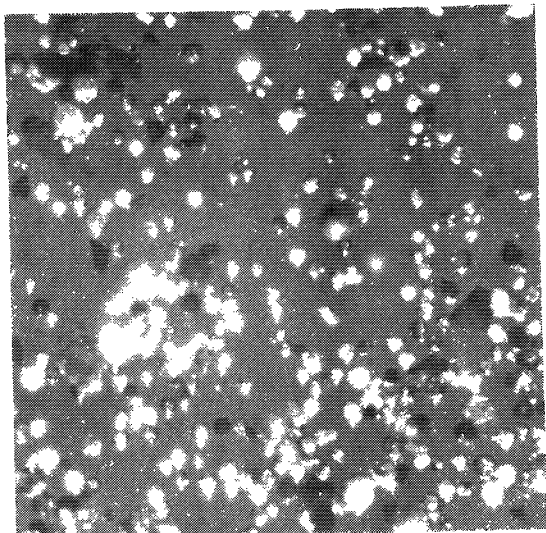
En Puentes de García Rodríguez aproximadamente 3 millones de t/año y en Ponferrada aproximadamente 0,7 millones de t/año.

Las primeras proceden de la combustión de lignitos y las segundas de la combustión de antracitas y semihullas. Ambas son homogéneas en su comportamiento, pero poseen propiedades muy distintas que las diferencian perfectamente unas de otras.

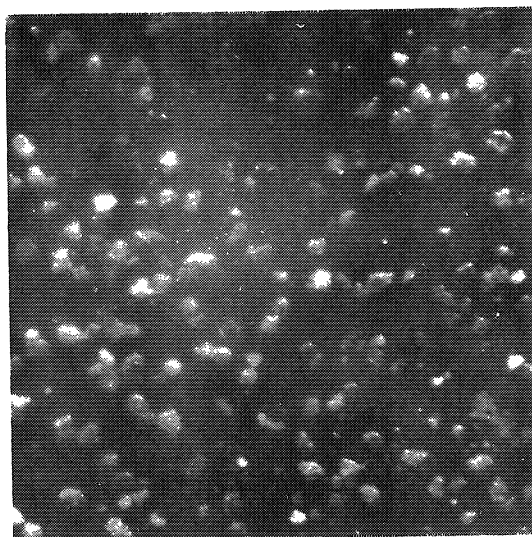
En el presente trabajo intentamos estudiarlas a fin de conocer su posible aplicación en la fabricación de cementos, adicionándolas en el molino de clínker.

1. MATERIALES DE PARTIDA

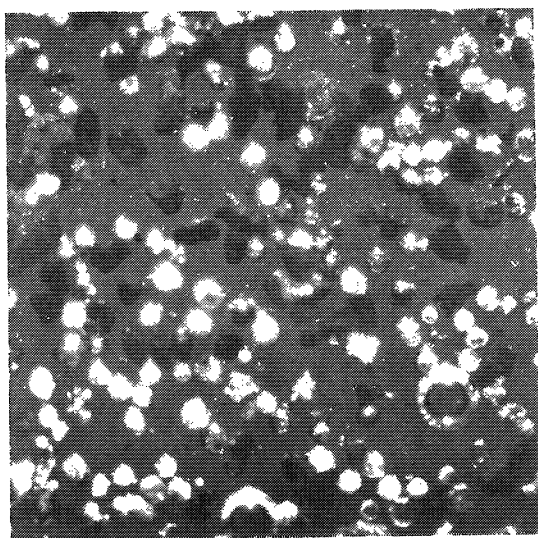
1.1. Cenizas volantes



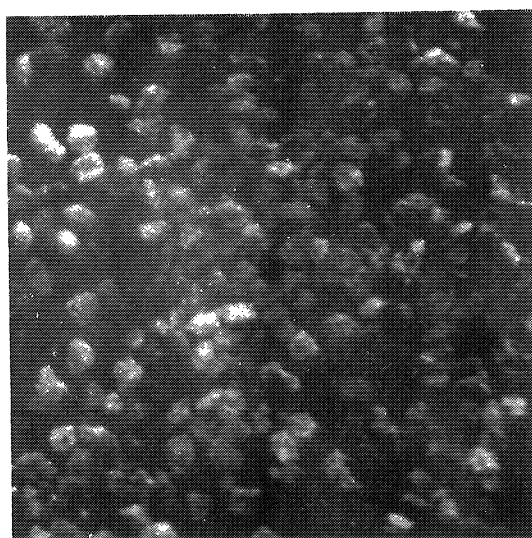
Fotografía 1.—Cenizas de Ponferrada.



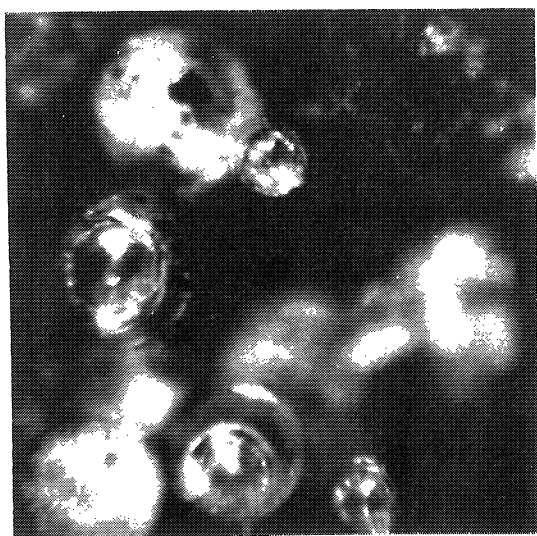
Fotografía 4.—Cenizas de Puentes de García Rodríguez.



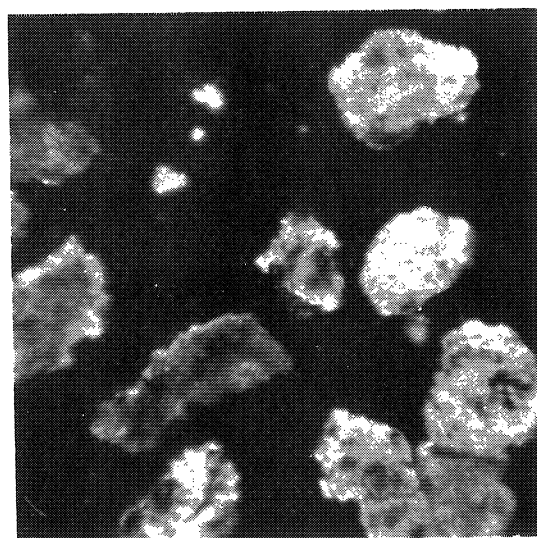
Fotografía 2.—Cenizas de Ponferrada.



Fotografía 5.—Cenizas de Puentes de García Rodríguez.



Fotografía 3.—Cenizas de Ponferrada.



Fotografía 6.—Cenizas de Puentes de García Rodríguez.

1.1.1. *Cenizas de Puentes de García Rodríguez y de Ponferrada. Observaciones con microscopio*

Las fotografías 1, 2 y 3 corresponden a cenizas de Ponferrada. Se observan abundantes partículas en forma de esferas y con superficies muy pulidas (bolas vítreas o cenosferas).

Las fotografías 4, 5 y 6 corresponden a cenizas de Puentes. Los gránulos presentan superficies rugosas.

1.1.2. *Análisis químico (según PCCH-64, apartado 2.7.)*

	Cenizas de Puentes	Cenizas de Ponferrada
Pérdida al fuego	3,2	6,3
Residuo insoluble	41,8	59,0
SO ₃	0,9	0,5
SiO ₂	20,8	13,2
Al ₂ O ₃	17,2	9,0
Fe ₂ O ₃	8,6	3,5
CaO	2,7	1,4
MgO	3,2	3,5
K ₂ O	1,1	2,5
Na ₂ O	0,2	0,6

En Francia existen cenizas volantes procedentes de la combustión de lignitos que contienen cantidades importantes de CaO. En nuestro caso, ambas cenizas contienen muy poco CaO

1.1.3. *Granulometría original*

Determinada mediante la tamizadora Alpine, por barrido de aire.

% retenido en el tamiz luz de malla (en μ)	Cenizas de Puentes %	Cenizas de Ponferrada %
200	4,0	0,2
120	14,5	1,4
90	24,0	3,6
60	42,2	9,9
45	60,5	18,7
35	71,7	33,3

1.1.4. *Densidad real original (según PCCH-64, apartado 2.3.)*

Cenizas de Puentes	Cenizas de Ponferrada
2,30 gr/cm ³	2,28 gr/cm ³

1.1.5. Las propiedades de las cenizas están muy relacionadas con su superficie específica

Nosotros, en un molino de bolas de laboratorio, hemos molido ambas cenizas durante el mismo tiempo (dos horas). La finura y densidad real alcanzaron los valores que a continuación exponemos.

Tamiz (en μ)	Cenizas de Puentes %	Cenizas de Ponferrada %
Granulometría medida mediante tamizadora Alpine		
200	0,2	0,0
120	0,8	0,0
90	2,0	0,1
60	7,1	0,7
40	15,3	3,4
33	27,5	10,8
Determinada mediante la pipeta de Andreasen		
40	21,0	11,8
50	23,5	27,5
20	57,1	57,9
15	70,3	69,4
8	82,6	88,7
Densidad real	2,50 g/cm ³	2,46 g/cm ³

En el gráfico de la figura 1 representamos las curvas granulométricas de ambas cenizas molidas.

Hemos intentado moler las cenizas volantes hasta alcanzar un grado de finura semejante al que se obtiene en nuestros molinos a escala industrial cuando se desea fabricar cementos de categoría 350, moliendo conjuntamente clínker, yeso y ceniza en proporción aproximada de 75, 5 y 20 % respectivamente.

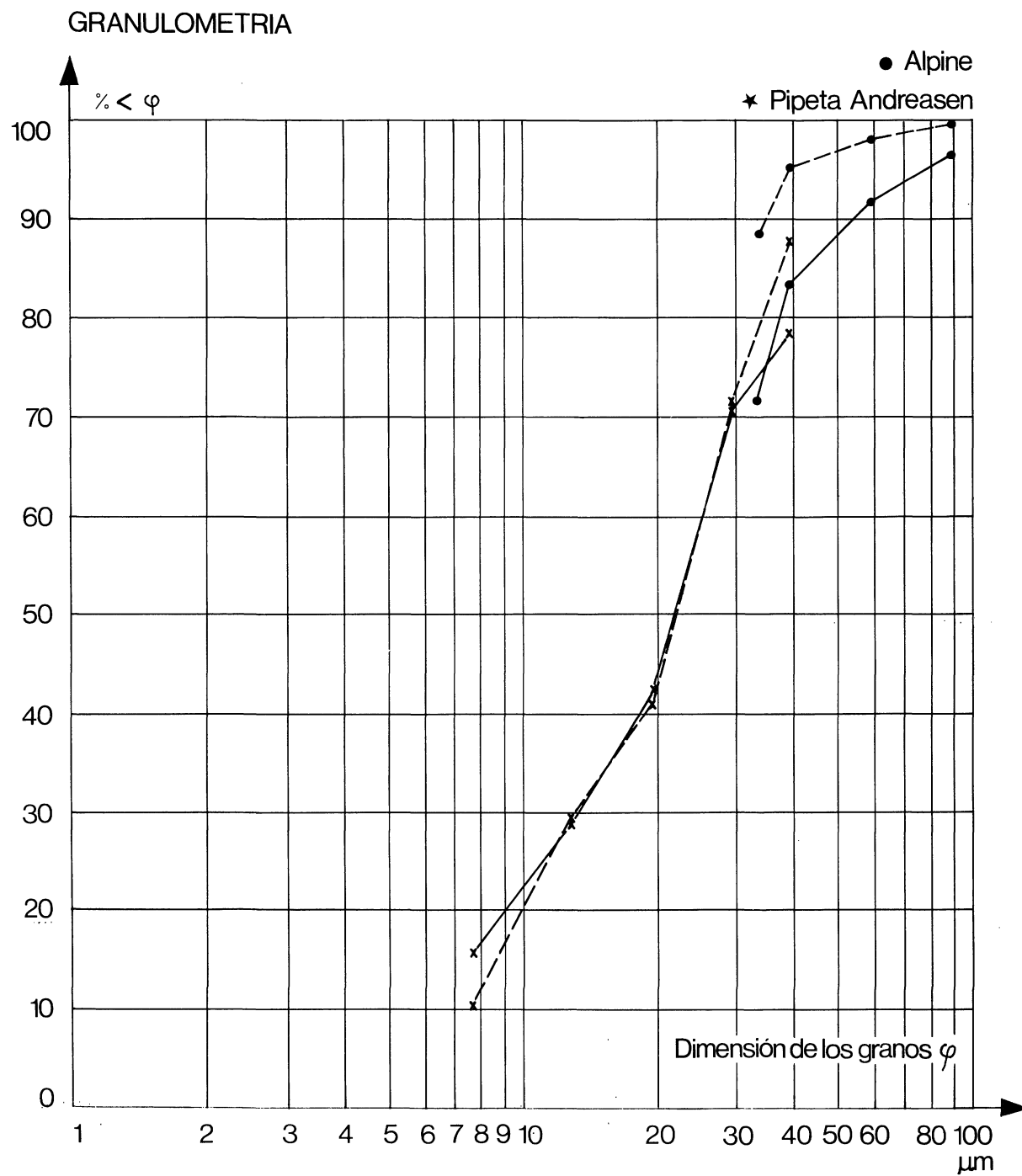
1.2. Cemento

El cemento de partida es una muestra representativa del cemento que en el período de dos años se fabricó en las instalaciones de Oura con la designación P-350 y que en este trabajo llamaremos cemento T. Se obtuvo por molturación conjunta de clínker, piedra de yeso crudo y las cenizas volantes anteriormente descritas, en proporciones de mezcla aproximada de 85, 5 y 10 % respectivamente.

Cumple la norma PCCH-64 en todas sus prescripciones, a excepción del residuo insoluble como consecuencia de la presencia de cenizas (ver análisis químico del punto 1.1.2.).

1.2.1. Análisis químico (según PCCH-64, apartado 2.7.).

	%
Pérdida al fuego	2,4
Residuo insoluble	5,5
SO ₃	2,7
SiO ₂	20,7
Al ₂ O ₃	7,4
Fe ₂ O ₃	2,9
CaO	55,1
MgO	2,6
K ₂ O	0,9
Na ₂ O	0,2



CENIZA de PUENTES (molda) ———
 " " PONFERRADA " - - - -

Fig. 1

1.2.2. *Índice puzolánico (según PCCH-64, apartado 2.733)*

	7 días	28 días
Alcalinidad total (milimoles/litro)	67,8	71,1
CaO (milimoles/litro)	7,6	4,8

1.2.3. *Propiedades físicas*

Superficie específica Blaine (según PCCH-64, apartado 2.2.) 3.061 cm²/gr.

Peso específico real (según PCCH-64, apartado 2.3.) 2,99 gr/cm³.

Expansión en autoclave (según PCCH-64, apartado 2.5.) 0,35 %.

Granulometría determinada mediante tamizadora Alpine por barrido de aire.

Retenido en tamiz de tamaño de malla (en μ)	%
200	0,1
120	0,9
90	3,0
60	10,6
40	19,4
33	32,1

Determinada mediante la pipeta de Andreasen

Tamaño (en μ)	%
40	27,6
30	36,9
20	55,7
15	68,5
8	82,8

En la figura 2 representamos gráficamente la curva granulométrica de este cemento "I".

1.2.4. *Propiedades mecánicas*

Resistencias mecánicas

El mortero realizado según PCCH-64, apartado 2.6., tiene un esparcimiento en la tabla de sacudidas del 76,5 % y las siguientes resistencias mecánicas, expresadas en kg/cm².

Edad	Flexotracción	Compresión
3 días	55	211
7 días	69	318
28 días	83	453

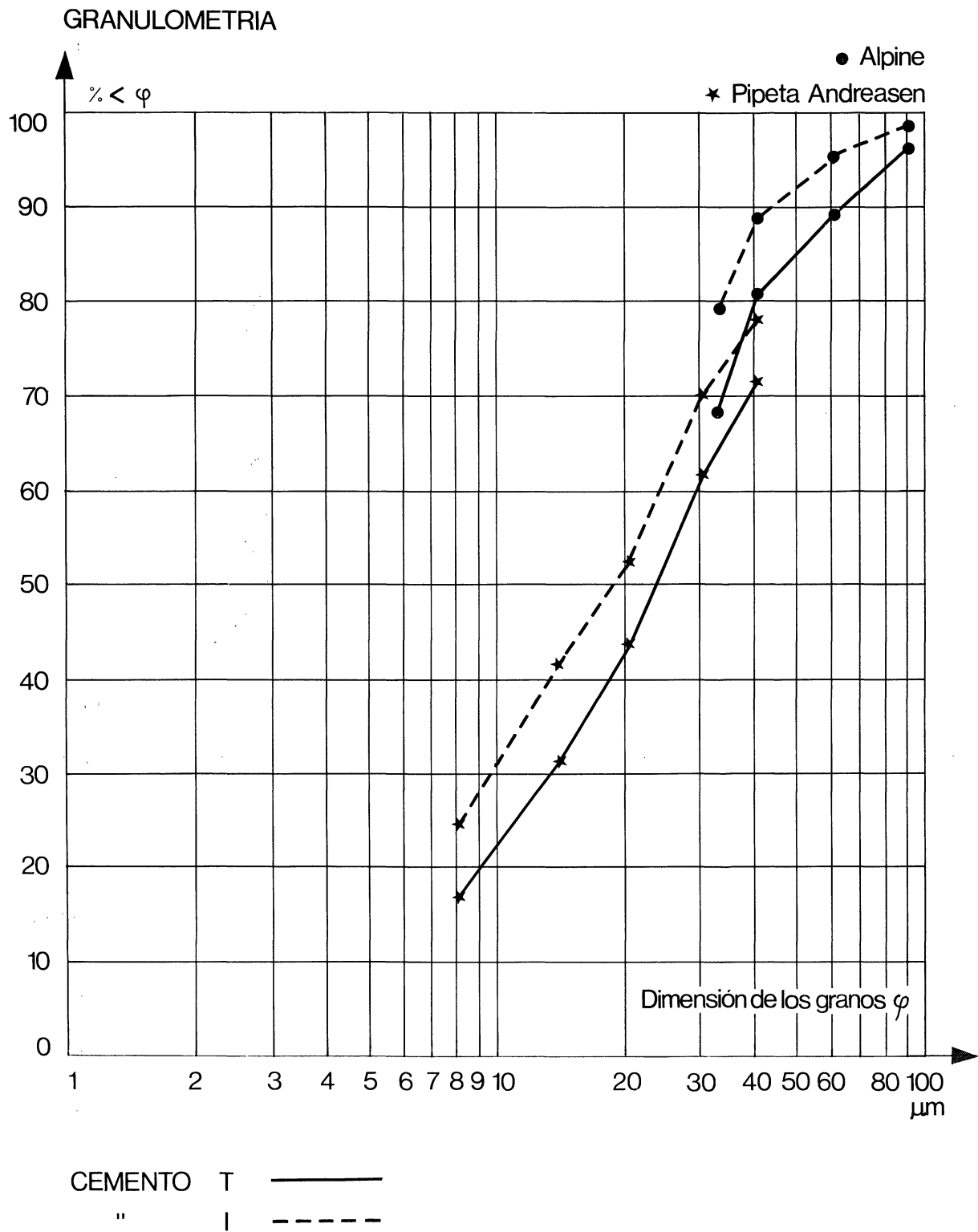


Fig. 2

2. FINALIDAD DEL ESTUDIO

2.1. Obtener cementos de categoría resistente 350, conteniendo aproximadamente el 20 y el 30 % de cenizas volantes

A fin de poder mantener el nivel resistente a cortas edades, hemos molido el cemento descrito en el punto 1.2. (cemento T) en el mismo molino de laboratorio en el que molimos las cenizas, hasta lograr el grado de finura que a continuación especificamos (cemento I).

Mediante tamizadora Alpine:

Tamiz (en μ)	% Retenido
200	0,1
120	0,3
90	1,3
60	4,4
40	11,5
33	20,3

Mediante pipeta de Andreasen:

Tamaño (en μ)	%
40	21,1
30	30,6
20	47,5
15	57,9
8	75,5

En la figura 2 representamos gráficamente la curva granulométrica de este cemento "I".

2.2. Conocer las propiedades de los cementos que se obtienen al adicionar una mayor proporción de una u otra ceniza, o una mezcla de ambas.

3. CEMENTOS PREPARADOS

Cemento I: Procede de la molturación en el molino de laboratorio del cemento de designación T.

Cemento II: Constituido por el 90 % del cemento T y 10 % de cenizas de Puentes molidas.

Cemento III: Constituido por el 80 % de cemento I y 20 % de cenizas de Puentes molidas.

Cemento IV: Constituido por el 90 % de cemento I y 10 % de cenizas de Ponferrada molidas.

Cemento V: Constituido por el 80 % de cemento I y 20 % de cenizas de Ponferrada molidas.

Cemento VI: Constituido por el 80 % de cemento I, 10 % de cenizas de Puentes molidas y 10 % de cenizas de Ponferrada molidas.

4. ENSAYOS REALIZADOS

Los valores que a continuación exponemos son media de 10 ensayos de muestras distintas.

4.1. Análisis químico (según PCCH-64, apartado 2.7.)

	CEMENTO (en %)						
	T	I	II	III	IV	V	VI
Pérdida al fuego	2,4	2,4	2,6	2,9	4,0	4,1	3,6
Residuo insoluble	5,5	5,5	8,8	12,4	10,3	15,7	14,1
SO ₃	2,7	2,7	2,5	2,3	2,4	2,2	2,3
SiO ₂	20,7	20,7	20,8	20,7	19,9	19,0	19,7
Al ₂ O ₃	7,4	7,4	8,5	9,2	7,6	7,7	8,5
Fe ₂ O ₃	2,9	2,9	3,4	3,9	3,0	3,0	3,4
CaO	55,1	55,1	50,5	45,3	49,9	45,1	45,1
MgO	2,6	2,6	2,5	2,4	2,5	2,6	2,6

4.2. Valor puzolánico

4.2.1. Ensayo a 40°C. Valores expresados en milimoles/litro

Cemento	7 DIAS		28 DIAS	
	Alcalinidad total	CaO	Alcalinidad total	CaO
T	67,8	7,6	71,7	4,8
I	70,4	7,7	74,5	4,8
II	62,4	5,3	70,9	4,4
III	57,5	4,2	57,8	1,8
IV	63,3	5,9	78,0	4,0
V	62,2	5,0	75,5	2,2
VI	59,6	4,7	65,9	2,0

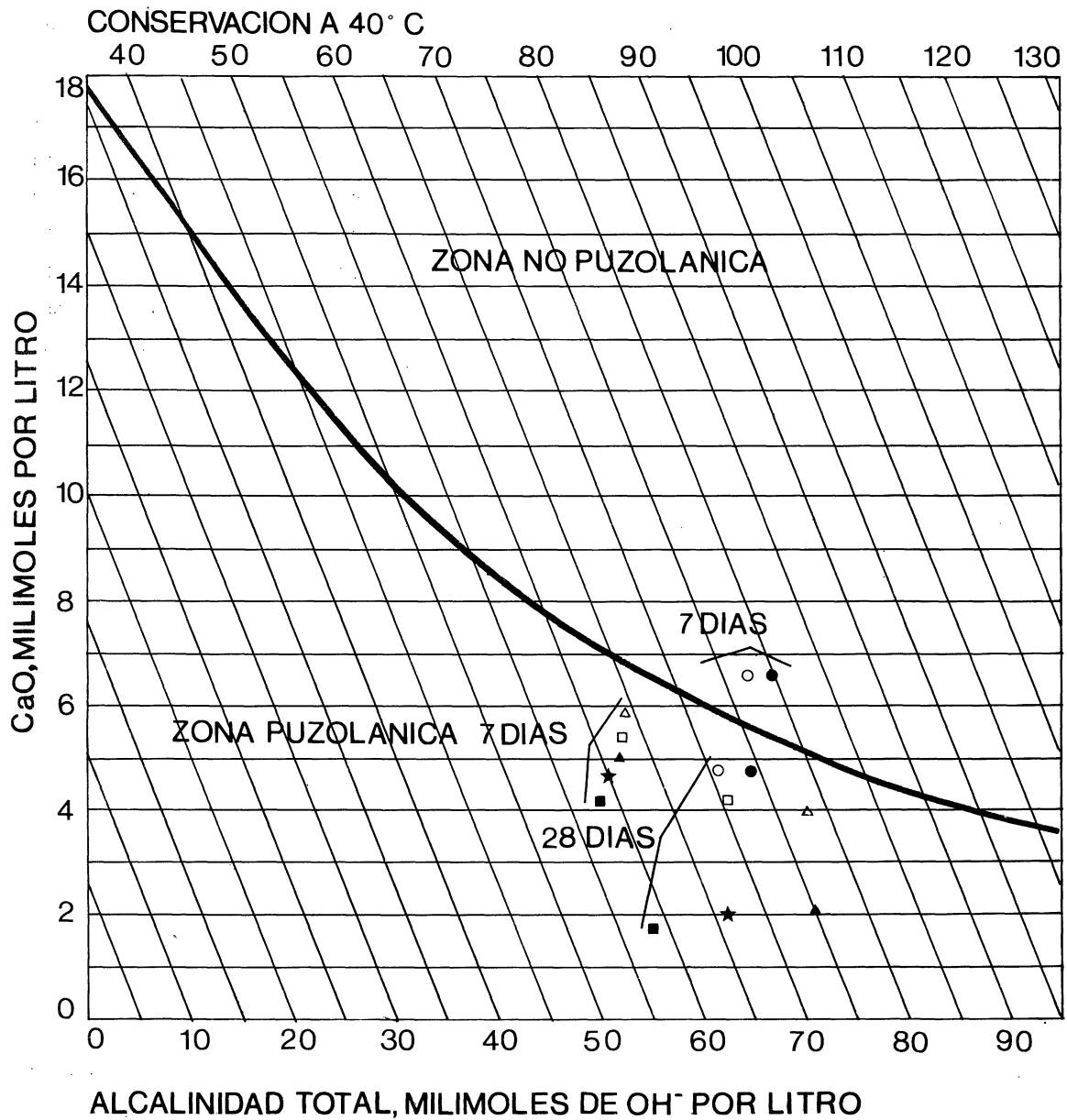
Estos valores se representan en el gráfico de la figura 3.

Los cementos T y I son puzolánicos a 28 días (recuérdese que ya contienen una adición de cenizas volantes de aproximadamente el 10 %). La adición de mayor cantidad de cenizas confiere a todos los cementos propiedades puzolánicas ya a la edad de 7 días.

Para un porcentaje de adición igual, las cenizas de Puentes aportan al cemento una puzolanidad mayor que las cenizas de Ponferrada.

4.2.2. Además de realizar este ensayo, hemos creído interesante conocer el comportamiento puzolánico de estos cementos a otras temperaturas (20°C y temperatura ambiente) y a edades superiores (90 y 180 días 6 meses y 1 año).

ENSAYO DE PUZOLANICIDAD SEGUN FRATINI



○	CEMENTO	T	△	CEMENTO	IV
●	„	I	▲	„	V
□	„	II	★	„	VI
■	„	III			

Fig. 3

4.2.2.1. Ensayo a 20°C

Los Erlenmeyer se conservaron en la cámara de curado de probetas hasta la edad del ensayo. Valores expresados en milimoles/litro.

Cemento	90 DIAS		180 DIAS		1 AÑO	
	Alcalinidad total	CaO	Alcalinidad total	CaO	Alcalinidad total	CaO
T	76,1	6,6	79,1	6,0	83,8	5,5
I	77,9	6,4	80,9	5,9	83,9	5,8
II	73,3	6,2	76,0	6,0	79,3	5,9
III	66,3	5,3	65,5	3,7	60,7	1,4
IV	76,2	5,9	82,9	5,4	88,3	4,5
V	74,4	5,4	82,6	4,5	83,2	1,3
VI	69,9	5,6	73,0	3,9	69,5	1,2

Representamos estos puntos en el diagrama de las figuras 4 y 5.

A esta temperatura son puzolánicos, ya a la edad de 90 días, los cementos III, V y VI, que se prepararon sustituyendo el 20 % del cemento I por cenizas volantes de Puentes, Ponferrada o una mezcla de ambas en igual proporción, respectivamente.

4.2.2.2. Ensayo a temperatura ambiente

Los Erlenmeyer se conservaron en un recipiente en el jardín del laboratorio hasta la edad del ensayo.

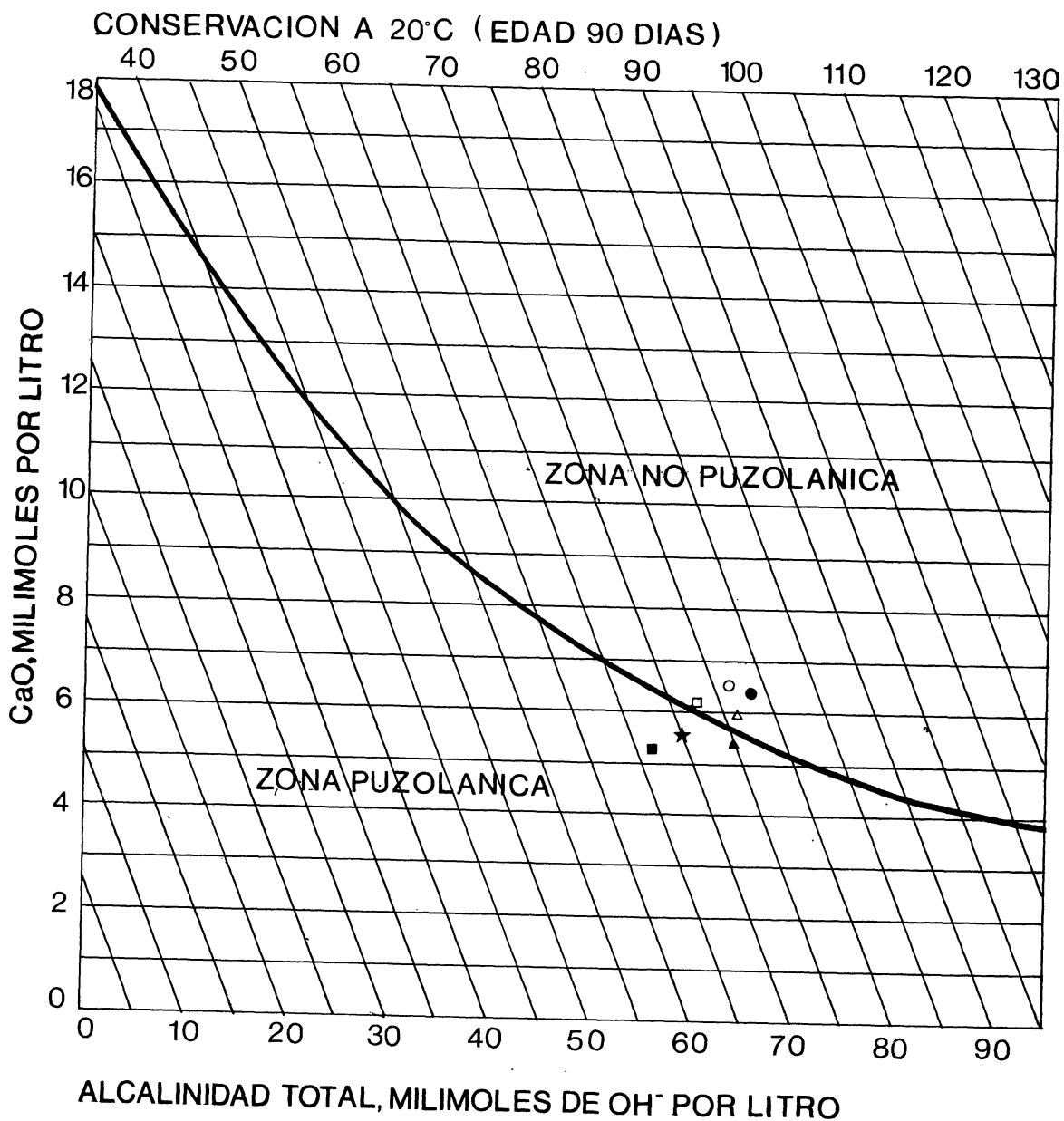
Cemento	90 DIAS		180 DIAS		1 AÑO	
	Alcalinidad total	CaO	Alcalinidad total	CaO	Alcalinidad total	CaO
T	78,4	10,7	78,2	7,6	81,9	6,6
I	81,1	10,2	79,8	7,5	81,2	6,3
II	69,6	7,2	72,8	6,5	76,7	6,5
III	62,4	6,3	64,7	5,1	63,3	3,3
IV	75,8	9,4	76,5	6,4	83,6	5,6
V	70,6	8,3	74,0	6,1	82,8	4,5
VI	64,6	6,7	68,9	5,9	71,2	3,5

Representamos estos valores en el diagrama de la figura 6.

A la temperatura ambiente sólo son puzolánicos a estas edades los cementos III (80 % de cemento I y 20 % de cenizas de Puentes molidas) y el VI (80 % de cemento I y 20 % de una mezcla a partes iguales de cenizas de Puentes y de Ponferrada).

Los cementos obtenidos por sustitución del 20 % de cemento I por cenizas de Ponferrada, no son puzolánicos hasta la edad de 1 año.

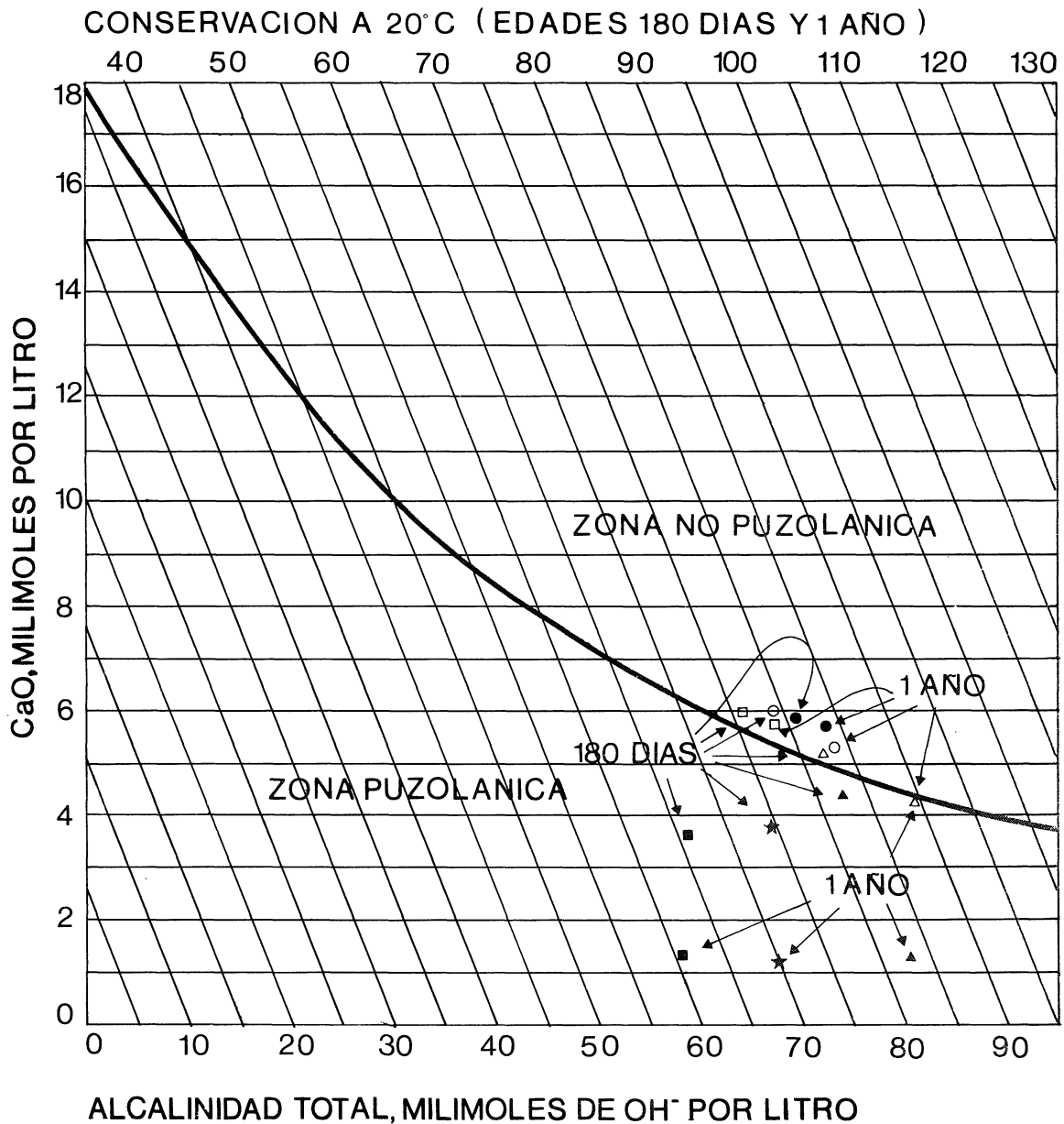
ENSAYO DE PUZOLANICIDAD SEGUN FRATINI



- | | | | |
|-----------|-------|-----------|------|
| ○ CEMENTO | T | △ CEMENTO | IV |
| ● | „ I | ▲ | „ V |
| □ | „ II | ★ | „ VI |
| ■ | „ III | | |

Fig. 4

ENSAYO DE PUZOLANICIDAD SEGUN FRATINI



○	CEMENTO	T	△	CEMENTO	IV
●	„	I	▲	„	V
□	„	II	★	„	VI
■	„	III			

Fig. 5

ENSAYO DE PUZOLANICIDAD SEGUN FRATINI

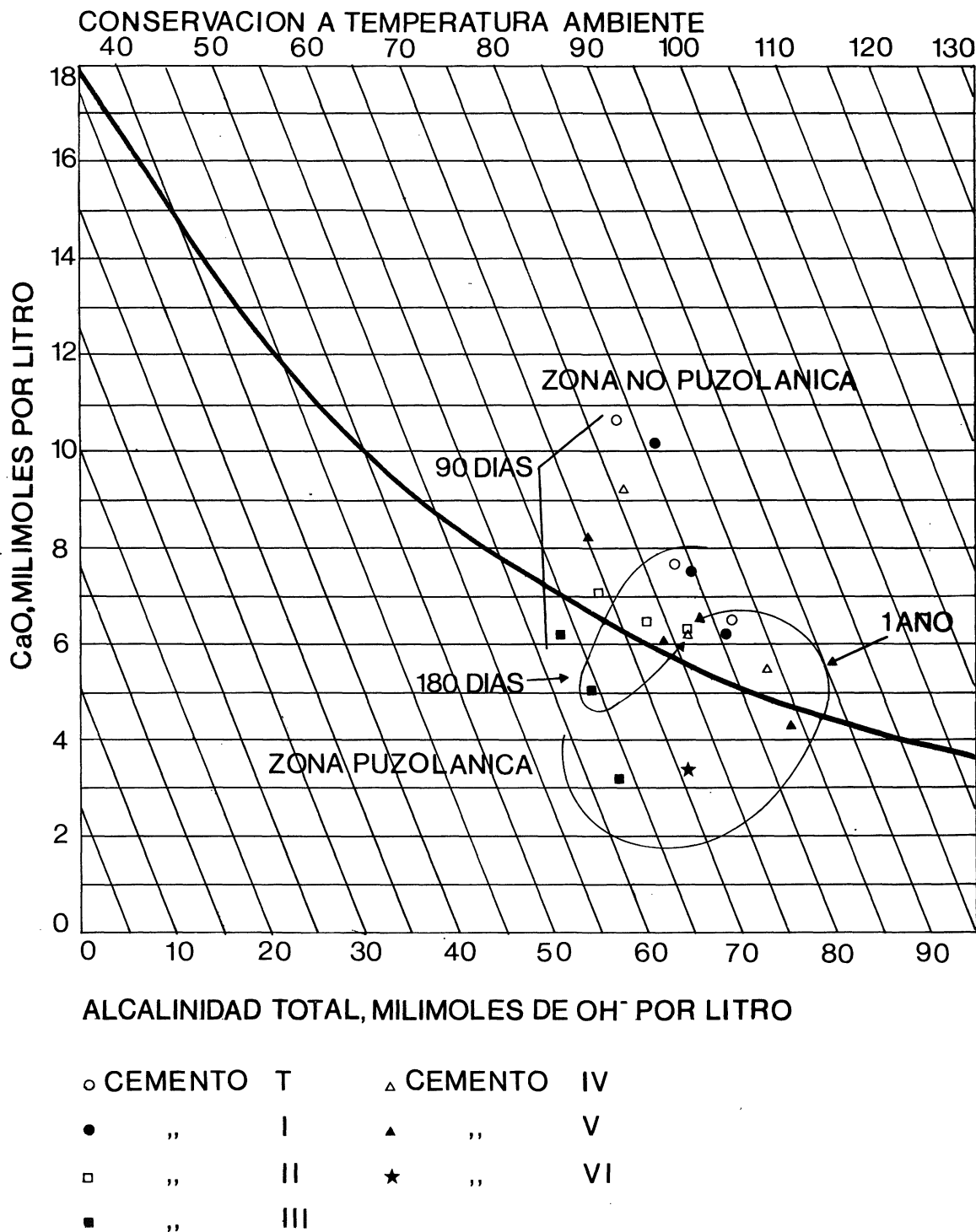


Fig. 6

4.2.3. Método propuesto por Lea en su libro "Química del cemento y del hormigón".

Consiste en determinar la diferencia de la aceleración del endurecimiento en función del aumento de la temperatura del agua (entre 20 y 50°C).

A la edad de 7 días se ensayan a flexotracción y compresión probetas de morteros de los distintos cementos, curadas en agua a 20°C, y otras curadas 5 días en agua a 20°C y 2 días en agua a 50°C. Expresamos los resultados obtenidos en kg/cm².

Cemento	Agua a 20°C	5 días agua 20°C 2 días agua 50°C	Diferencias
F L E X O T R A C C I O N			
T	69	78	+ 9
I	76	81	+ 5
II	73	89	+ 16
III	66	99	+ 33
IV	74	90	+ 16
V	68	94	+ 26
VI	69	99	+ 30
C O M P R E S I O N			
T	318	396	+ 78
I	408	502	+ 94
II	367	519	+ 152
III	332	523	+ 191
IV	381	507	+ 126
V	340	503	+ 163
VI	322	516	+ 194

Las cenizas de Puentes aportan al cemento un valor puzolánico más alto que las de Ponferrada, según métodos de Fratini y Lea. Cuanto mayor es el contenido de cenizas volantes, más alto es el valor puzolánico del cemento.

4.3. Propiedades físicas

4.3.1. Granulometría

Resultados obtenidos al realizar el ensayo en la tamizadora Alpine por barrido de aire.

	TAMIZ			% RETENIDO			
	T	I	II	III	IV	V	VI
200	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
120	0,9	0,3	0,6	0,7	0,5	0,3	0,7
90	3,0	1,3	1,6	1,6	1,0	0,9	1,5
60	10,6	4,4	5,4	4,7	3,7	3,3	4,3
40	19,4	11,5	12,1	11,4	9,6	8,8	10,8
33	32,1	20,3	22,1	22,1	20,8	17,9	20,5

Ensayo realizado mediante la pipeta de Andreasen.

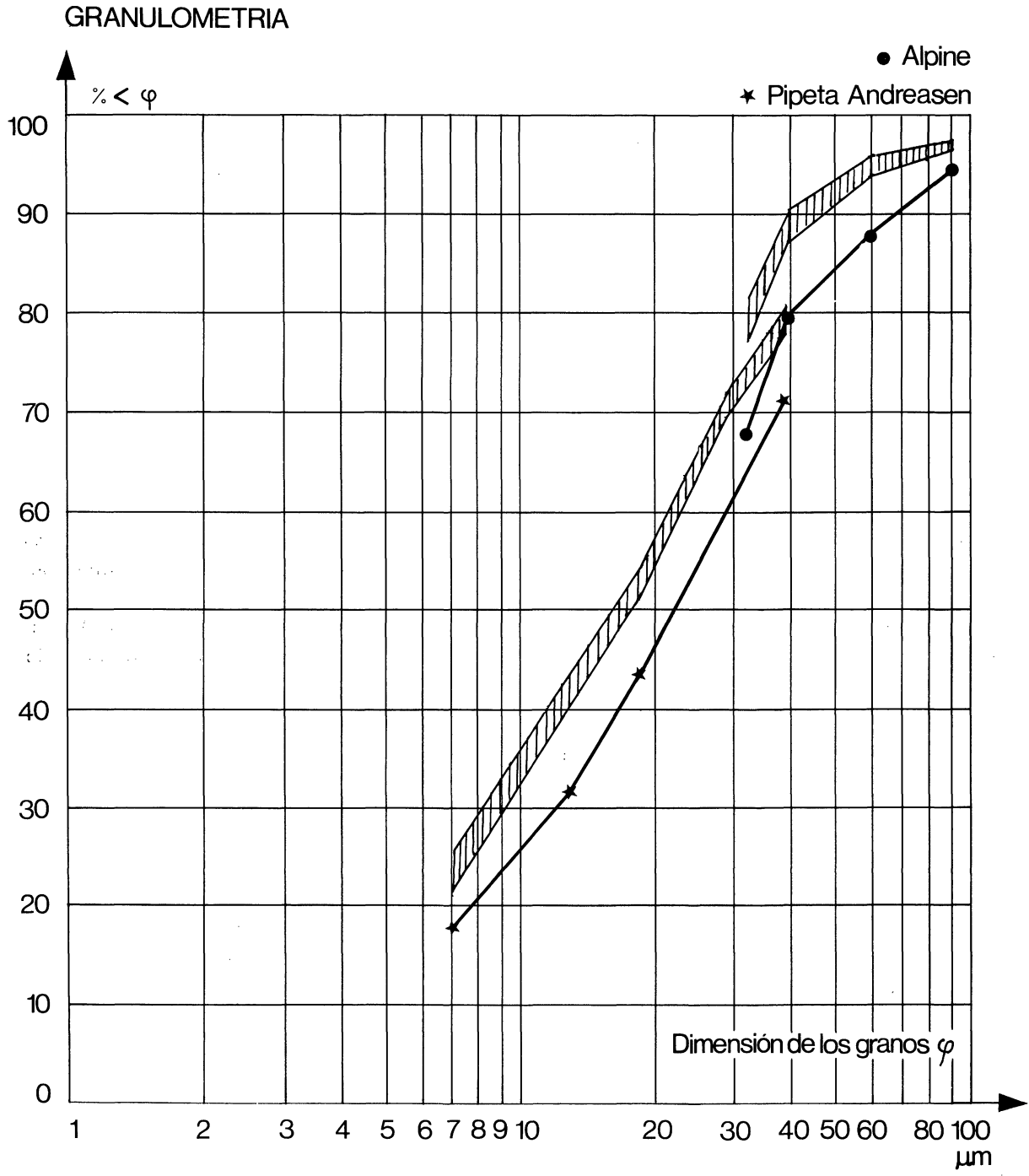
Tamaño	T	I	II	III	IV	V	VI
40	27,6	21,1	18,7	19,8	17,8	18,4	19,1
30	36,9	30,6	27,8	28,7	27,7	27,4	28,7
20	55,7	47,5	46,7	47,7	46,3	47,8	47,0
15	68,5	57,9	58,1	59,1	58,9	59,2	60,0
8	82,8	75,5	76,5	76,0	77,7	79,9	75,4

En la figura 7 representamos estas granulometrías. Las curvas granulométricas de los cementos I, II, III, IV, V y VI están situadas dentro de la zona rayada.

Como se puede observar, las granulometrías de los cementos que constituyen este estudio están incluidas en una gama de valores muy estrecha.

4.3.2. *Peso específico real (según PCCH-64, apartado 2.3.)*

Cemento	gr/cm ³
T	2,99
I	3,01
II	2,96
III	2,90
IV	2,94
V	2,88
VI	2,89



CEMENTOS I, II, III, IV, V y VI
 CEMENTO T.

Fig. 7

4.3.3. Superficie específica Blaine (según PCCH-64, apartado 2.2.)

La determinación de la superficie específica Blaine se ha realizado teniendo en consideración el peso específico real.

La porosidad, en todos los casos 0,5.

Cemento	cm ² /gr
T	3.061
I	4.709
II	5.078
III	6.138
IV	4.480
V	4.018
VI	4.719

Las cenizas de Puentes aumentan notablemente el Blaine.

Probablemente la forma y superficie de los gránulos de las cenizas volantes (ver punto 1.1.1.) influye en la permeabilidad al aire, al igual que en la cantidad de agua de amasado.

Sólo la diferencia de las granulometrías (ver apartado 1.1.5. y gráfico de la figura 1), quizás no justifique por sí sola estas diferencias que se observan en los valores Blaine y la cantidad de agua de amasado para obtener un mismo esparcimiento.

4.3.4. Expansión en autoclave (según PCCH-64, apartado 2.5.)

Cemento	%
T	0,35
I	0,25
II	0,15
III	0,11
IV	0,15
V	0,13
VI	0,12

4.3.4.1. El cemento T después de molido (cemento I), presenta una menor expansión en autoclave. Probablemente porque eventuales nódulos de cal libre reaccionan con el agua de amasado antes del fraguado del cemento y también porque el aumento de finura de la ceniza, que ya contiene el cemento T (aproximadamente un 10 %), trae consigo un mayor efecto puzolánico (ver gráfico de la figura 3).

4.3.4.2. La adición de cenizas proporciona a los cementos una mayor estabilidad.

4.4. Ensayos mecánicos

4.4.1. Preparación de morteros

Los morteros de estos cementos se prepararon ateniéndose en todo a la norma PCCH-64, apartado 2.6., excepto en lo que se refiere al agua de amasado, que se añadió en la cantidad suficiente para lograr en cada caso un esparcimiento análogo (76,5 %) al obtenido con el mortero de cemento T y relación agua/cemento = 0,5 (ver punto 1.2.4.).

Las relaciones agua/cemento necesarias han sido:

<u>Cemento</u>	
I	0,485
II	0,501
III	0,519
IV	0,475
V	0,463
VI	0,490

No hemos operado a relación agua/cemento constante (igual a 0,5) a fin de tener en cuenta el efecto que el cambio de finura y la adición de una u otra ceniza puede tener en la cantidad de agua de amasado necesaria para lograr el mismo esparcimiento.

Las cenizas de Ponferrada disminuyen el agua de amasado para un mismo esparcimiento. Las cenizas de Puentes aumentan la cantidad de agua.

4.4.1.1. Se determinó la exudación, al cabo de las dos horas, de todos los morteros siguiendo el método que M. Venuat describe en su trabajo "De l'étude du comportement rhéologique de quelques cendres volantes" (Revue des Matériaux de Construction n.º 615). Se han utilizado recipientes cilíndricos de 5 cm de diámetro y 20 cm de altura.

El mortero de cemento T (realizado según PCCH-64, apartado 2.6.) tiene una exudación de 2,5 gr.

Los morteros a que nos referimos en el punto 4.4.1. presentan todos ellos una exudación inferior al 50 % del valor del mortero de cemento T.

4.4.1.2. Hemos preparado un total de 270 probetas de cada uno de los cementos, distribuidas en las diferentes condiciones que a continuación exponemos (10 probetas a cada edad y para cada condición).

4.4.2. Condiciones de curado y conservación

Conservamos probetas en cuatro condiciones:

4.4.2.1. Agua a 20°C (según norma)

4.4.2.2. Temperatura ambiente

Las probetas a las 24 horas se desmoldaron y colocaron sobre la hierba del jardín del laboratorio hasta la edad del ensayo.

Las probetas sufren todas las variaciones climatológicas (temperatura, lluvia, sol y nieve de nuestra región; en un lugar a 600 m de altura sobre el nivel del mar).

Antes del ensayo a flexotracción y compresión las probetas se sumergen en agua durante 24 horas.

4.4.2.3. Probetas conservadas en un recipiente que contiene una disolución de SO_4Mg en agua con una concentración del 5 % :

- a) situado en el interior de la cámara de conservación de probetas a 20°C.
- b) Situado en el exterior del laboratorio a temperatura ambiente.

4.4.3. Edades del ensayo

De todos los cementos se conservaron probetas para ensayar a las edades de 3, 7, 28, 90 y 180 días y 1, 2, 3 y 4 años en los medios de conservación de agua a 20°C y aire a temperatura ambiente.

En SO_4Mg a 20°C se conservaron probetas para ensayar a las edades de 180 días, 1, 2, 3 y 4 años. En SO_4Mg a temperatura ambiente, las edades de ensayo han sido 2, 3 y 4 años.

4.4.4. Resultados

Los valores indicados para cada cemento, a cada edad y medio de conservación, son media de 10 ensayos. Expresados en kg/cm^2 .

4.4.4.1. Conservación en agua a 20°C

Edad	T	C E M E N T O					
		I	II	III	IV	V	VI
F L E X O T R A C C I O N							
3 días	55	63	57	46	59	53	50
7 días	69	76	73	66	74	68	69
28 días	83	86	87	84	86	85	77
90 días	89	92	90	99	92	89	89
180 días	90	95	91	86	92	87	81
1 año	92	96	84	92	97	99	97
2 años	95	97	95	89	100	99	94
3 años	98	101	98	92	102	104	98
4 años	95	96	96	91	103	102	97
C O M P R E S I O N							
3 días	211	293	245	195	270	237	213
7 días	318	408	367	332	381	340	322
28 días	453	533	531	522	524	494	517
90 días	533	613	616	683	630	621	610
180 días	563	648	666	602	688	667	637
1 año	610	674	673	634	705	692	682
2 años	633	691	662	636	719	719	682
3 años	639	721	701	677	745	762	729
4 años	658	729	678	677	733	735	725

4.4.4.2. Medio de conservación, aire a temperatura ambiente

Edad	<u>C E M E N T O</u>						
	T	I	II	III	IV	V	VI
	<u>F L E X O T R A C C I O N</u>						
3 días	45	54	49	38	49	46	41
7 días	58	64	58	46	57	56	55
28 días	79	72	76	69	79	70	69
90 días	82	81	81	71	83	80	79
180 días	91	97	94	85	95	86	91
1 año	89	96	97	84	99	92	91
2 años	97	97	90	83	97	90	88
3 años	102	99	99	93	105	106	95
4 años	111	108	102	104	108	111	113
	<u>C O M P R E S I O N</u>						
3 días	177	239	198	155	215	188	164
7 días	248	318	280	212	285	252	237
28 días	369	442	396	352	413	372	370
90 días	470	531	514	481	508	493	505
180 días	514	570	575	532	565	563	560
1 año	554	610	583	546	618	605	580
2 años	587	649	607	602	648	644	600
3 años	613	660	664	616	669	695	658
4 años	626	669	627	623	650	708	660

4.4.4.3. Medio de conservación, SO₄Mg a 20°C

Edad	<u>C E M E N T O</u>						
	T	I	II	III	IV	V	VI
	<u>F L E X O T R A C C I O N</u>						
180 días	96	107	103	108	116	114	108
1 año	62	100	102	110	104	113	115
2 años	12	57	82	112	96	106	108
3 años	3	21	64	99	84	105	97
4 años	0	9	51	84	63	89	88
	<u>C O M P R E S I O N</u>						
180 días	556	617	647	607	660	659	627
1 año	526	622	632	581	676	652	633
2 años	242	537	584	534	640	644	600
3 años	77	311	545	474	594	616	543
4 años	0	192	423	361	508	522	427

4.4.4.4. Medio de conservación, SO₄Mg a temperatura ambiente

Edad	T	C E M E N T O					
		I	II	III	IV	V	VI
<u>F L E X O T R A C C I O N</u>							
2 años	4	54	80	99	80	92	102
3 años	0	16	60	96	57	95	92
4 años	0	2	40	86	34	80	80
<u>C O M P R E S I O N</u>							
2 años	50	414	558	537	543	604	581
3 años	0	114	474	477	513	569	532
4 años	0	51	330	456	353	541	467

4.4.5. Si damos el valor 1 a las resistencias del cemento T, y si referimos las resistencias a compresión de los distintos cementos a cada edad y en cada condición a las correspondientes del cemento T, obtendremos la siguiente tabla:

Edad	C E M E N T O					
	I	II	III	IV	V	VI
<u>A G U A A 20°C</u>						
3 días	1,39	1,16	0,92	1,28	1,12	1,01
7 días	1,28	1,15	1,04	1,20	1,07	1,01
28 días	1,18	1,17	1,15	1,16	1,09	1,14
90 días	1,15	1,16	1,09	1,18	1,17	1,14
180 días	1,15	1,18	1,07	1,22	1,18	1,13
1 año	1,10	1,10	1,04	1,16	1,13	1,12
2 años	1,09	1,05	1,00	1,14	1,14	1,08
3 años	1,13	1,10	1,06	1,17	1,19	1,14
4 años	1,11	1,03	1,03	1,11	1,12	1,10
<u>A I R E A T E M P R A T U R A A M B I E N T E</u>						
3 días	1,35	1,12	0,88	1,21	1,06	0,93
7 días	1,28	1,13	0,85	1,15	1,02	0,96
28 días	1,20	1,07	0,95	1,12	1,01	1,00
90 días	1,13	1,09	1,02	1,08	1,05	1,07
180 días	1,11	1,12	1,04	1,10	1,10	1,09
1 año	1,10	1,05	0,99	1,12	1,09	1,05
2 años	1,11	1,03	1,03	1,10	1,10	1,10
3 años	1,08	1,08	1,00	1,14	1,13	1,07
4 años	1,07	1,00	1,00	1,04	1,13	1,05

C E M E N T O

Edad	I	II	III	IV	V	VI
	<u>SO₄Mg a 20°C</u>					
180 días	1,11	1,16	1,09	1,19	1,19	1,13
1 año	1,18	1,20	1,10	1,29	1,24	1,20
2 años	2,22	2,41	2,20	2,64	2,66	2,48
3 años	4,04	7,08	6,16	7,71	8,00	7,05
4 años	—	—	—	—	—	—
	<u>SO₄Mg A TEMPERATURA AMBIENTE</u>					
2 años	8,28	11,16	10,74	10,86	12,08	11,62
3 años	—	—	—	—	—	—
4 años	—	—	—	—	—	—

4.4.5.1. En la figura 8 representamos gráficamente los datos de la tabla correspondiente al medio de conservación, agua a 20°C.

Como se puede observar, ya a la edad de 7 días, los cementos I, II, III, IV, V y VI, tienen mayores resistencias que el cemento T (recuérdese que están molidos a una mayor finura que el cemento T), y a 3 días, únicamente el cemento III, tiene una resistencia menor que la del cemento T.

Las cenizas de Puentes reaccionan con más facilidad a primeras edades con el hidróxido cálcico producido en la hidratación del clínker. Al realizar los ensayos mecánicos a igualdad de esparcimiento, cuando empleamos cenizas de Ponferrada, obtenemos sin embargo a cortas edades un nivel resistente más alto. En otros estudios hemos operado a igualdad de relación a/c (0,5 según norma) y en estas condiciones, a primeras edades, el nivel resistente es mayor al utilizar cenizas de Puentes.

4.4.5.2. En la figura 9 representamos los valores de los distintos cementos conservados al aire a temperatura ambiente.

Vemos que los cementos en los que el 10 % del cemento I ha sido sustituido por cenizas, presentan mayor resistencia que el cemento T. En el caso de los cementos en los que el 20 % de cemento I ha sido sustituido por cenizas, a partir de la edad de 90 días, ya superan las resistencias del cemento T.

4.4.5.3. En la figura 10, se representan los valores correspondientes al medio de conservación SO₄Mg a 20°C.

La sustitución de parte del cemento I por cenizas volantes, lleva consigo una mayor estabilidad frente al ataque del SO₄Mg.

4.4.5.4. Las probetas del cemento T, conservadas en SO₄Mg a temperatura ambiente, están a la edad de 2 años, prácticamente deshechas.

4.4.5.4.1. Sólo el aumento de finura (cemento I), y su incidencia en las propiedades puzolánicas, y en la cantidad de agua de amasado, origina una menor pérdida de las resistencias mecánicas a esta edad.

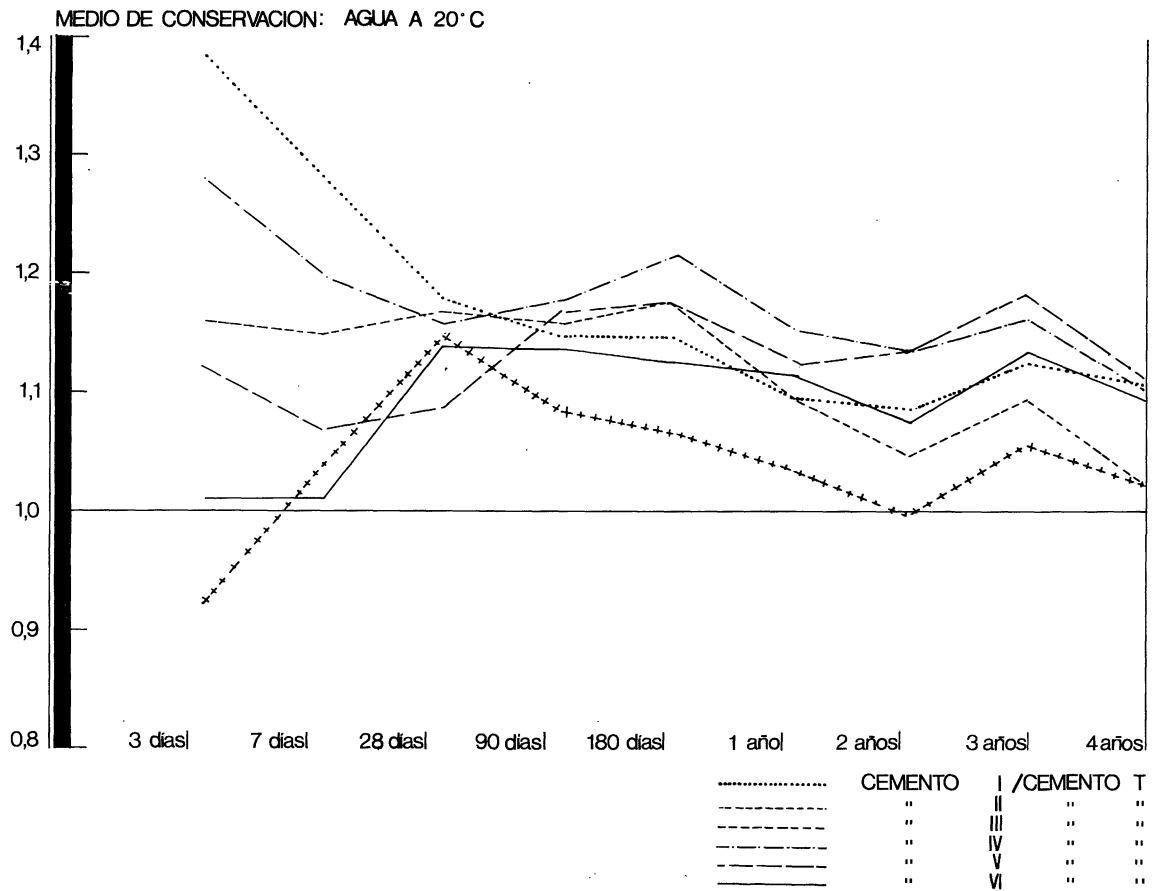


Fig. 8

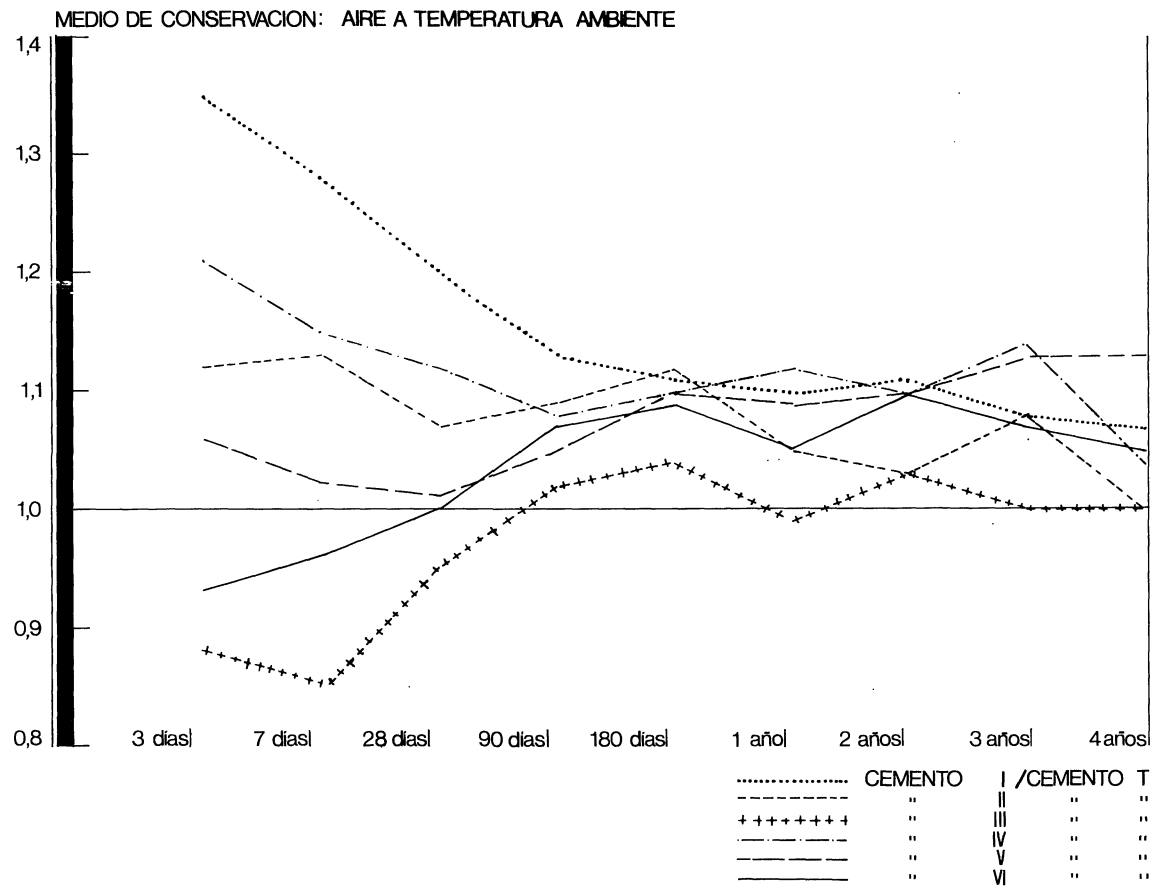


Fig. 9

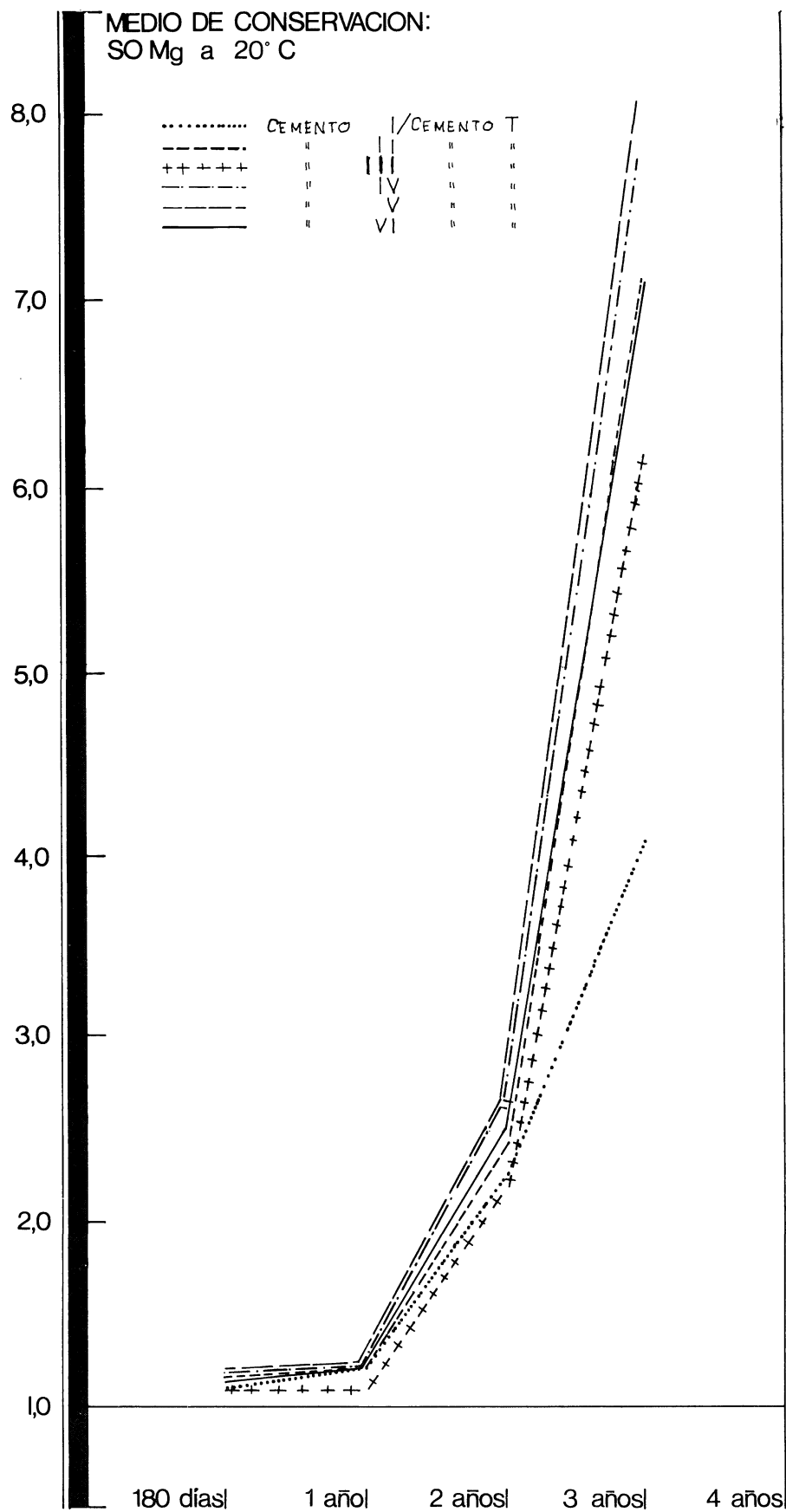


Fig. 10

MEDIO DE CONSERVACION: AGUA A 20° C

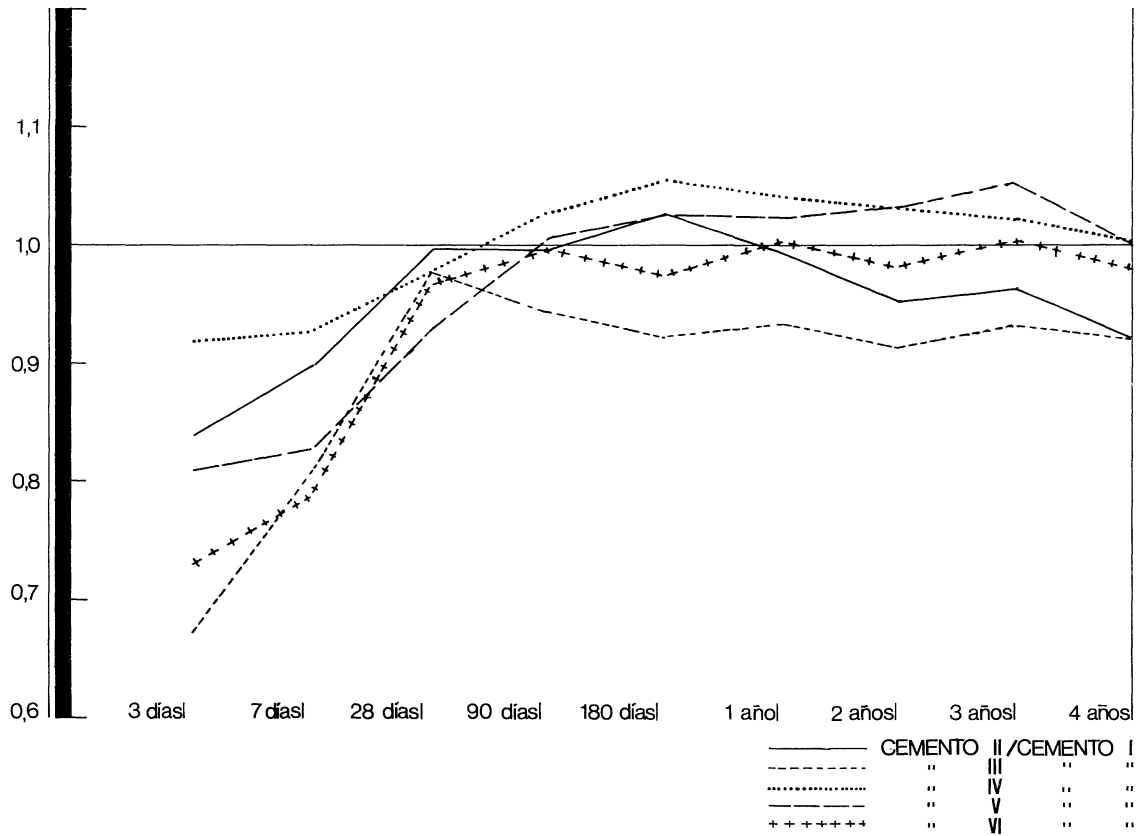


Fig. 11

MEDIO DE CONSERVACION: AIRE A TEMPERATURA AMBIENTE

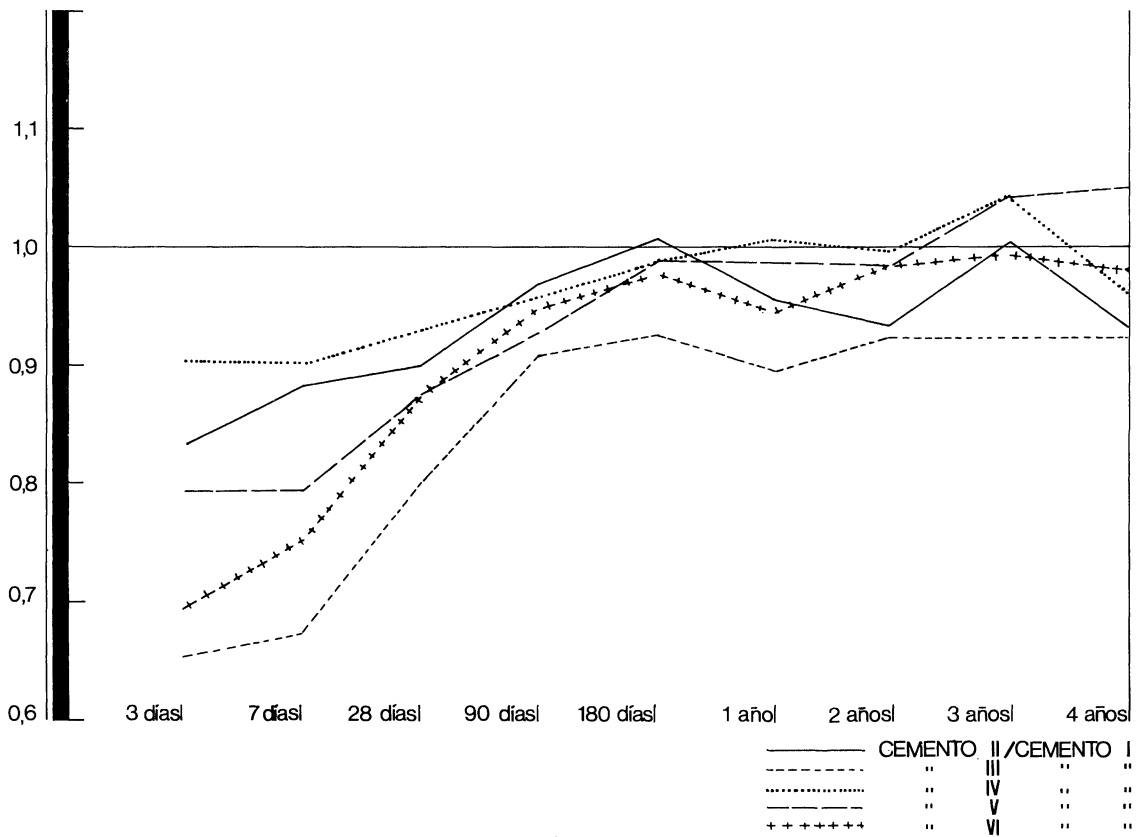


Fig. 12

A la edad de 4 años, las probetas de mortero de cemento I, están muy deterioradas después de su conservación en SO_4Mg tanto a 20°C como a temperatura ambiente.

4.4.5.5. Las figuras 11, 12, 13 y 14, recogen las resistencias de los cementos obtenidos por una mayor adición de cenizas (II, III, IV, V y VI) referidos al cemento I (cemento T molido) que ya contiene aproximadamente un 10 % de ceniza volante.

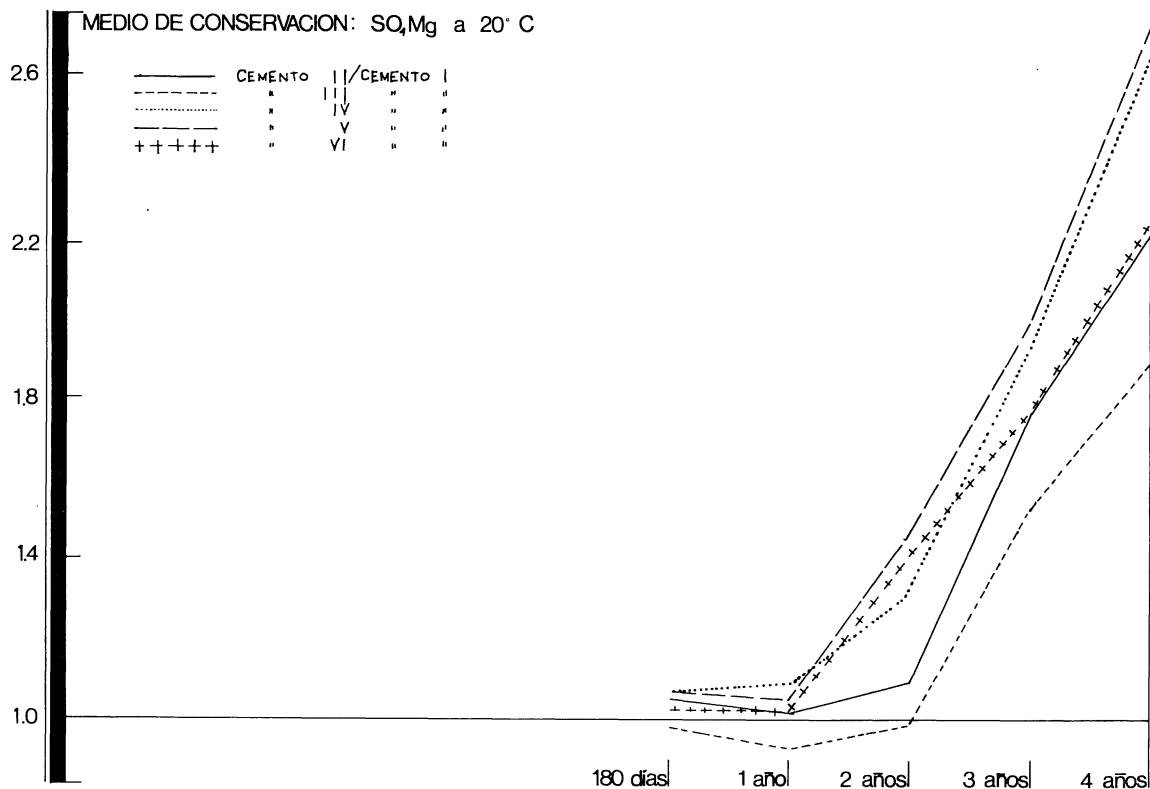


Fig. 13

5. CONCLUSIONES

5.1. Teniendo en cuenta la evolución de las resistencias mecánicas en los distintos medios de conservación estudiados y el coste actual de la energía para la producción de clínker, la utilización de estos materiales que tienen unas marcadas propiedades puzolánicas, creemos pueden contribuir al ahorro de energía.

La norma RC-75 admite que los cementos portland con adiciones activas pueden contener no más del 20 % de estos materiales. En Francia, la nueva norma NF15-301, admite para el cemento portland compuesto CPJ una adición menor del 35 %.

En nuestros laboratorios continuamos estudiando adiciones en cuantía superior al 20 % en cementos fabricados a escala industrial. Con ellos preparamos morteros con diferentes relaciones agua/cemento, y las probetas se conservan hasta la edad de 7 años en numerosos medios de curado.

5.2. Las cenizas volantes de ambas procedencias, al mezclarlas con el cemento estudiado, aumentan su durabilidad frente a la agresión de disoluciones de SO_4Mg del 5 % de concentración.

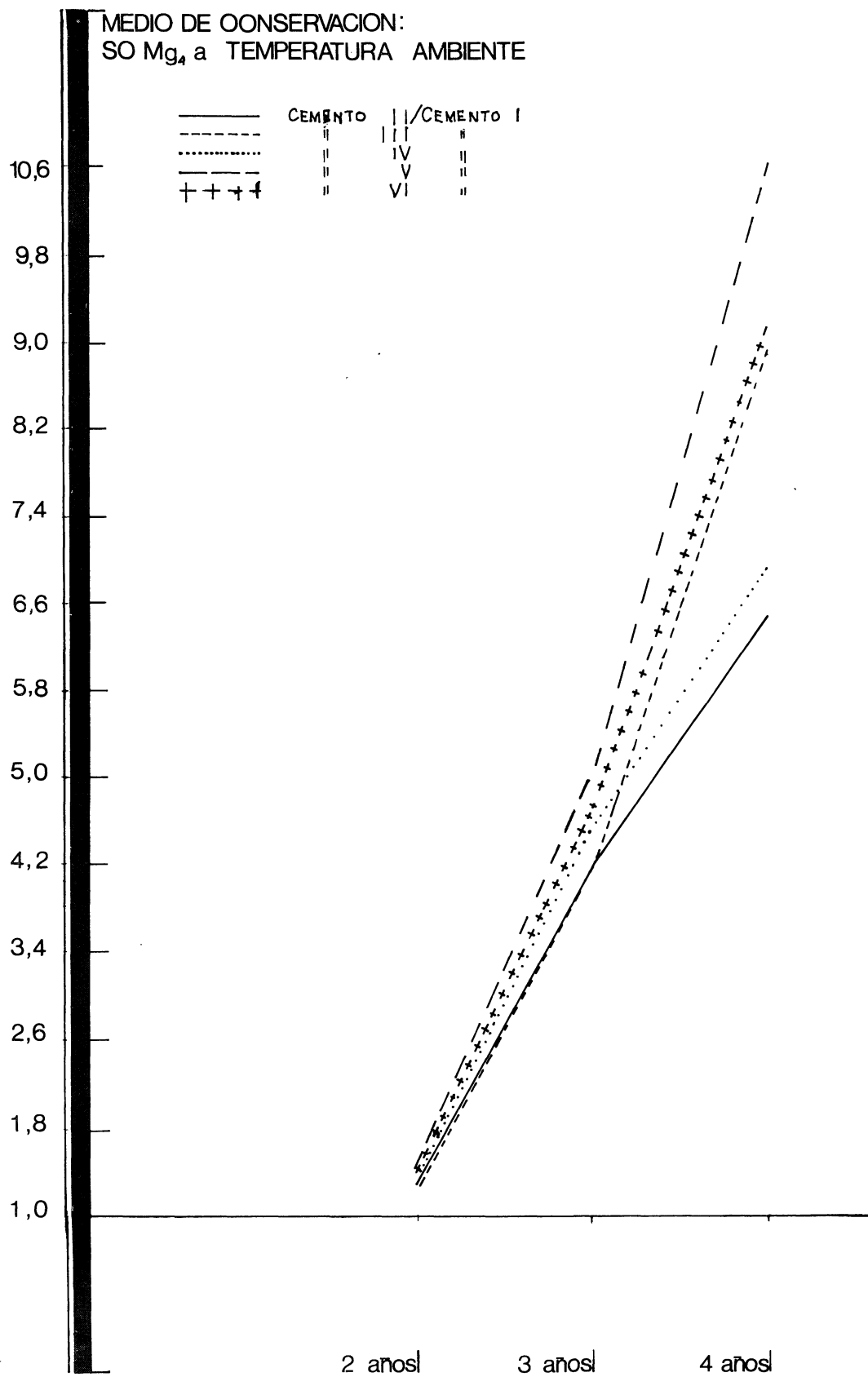


Fig. 14

6. BIBLIOGRAFIA

- (1) VENUAT, M.: "De l'étude du comportement rhéologique de quelques cendres volantes", revue des Matériaux de Construction n.º 615. Edita C.E.R.I.L.H., Paris.
- (2) LEA, M. F.: "Química del cemento y del hormigón". Ed. Edward Arnold. Londres 1960.
- (3) ALONSO RAMIREZ, J. L.: "Estudio físico-químico y técnico de diversos tipos de cenizas, y su empleo como materiales de construcción". Publicación n.º 199 del Laboratorio Central de Ensayos de Materiales de Construcción, Madrid, 1969.
- (4) Pliego de condiciones para la recepción de conglomerantes hidráulicos. Instituto Eduardo Torroja de la Construcción y del Cemento. PCCH-64. Madrid, 1964.
- (5) Recepción de conglomerantes: Pliego de prescripciones técnicas generales para la recepción de cementos RC-75. B.O.E., Madrid, 1975.
- (6) La nouvelle normalisation française des ciments. Paris, septiembre de 1978.