

# LAS PROPIEDADES PUZOLANICAS DE LA PIEDRA POMEZ VOLCANICA DEL PRE-PIRINEO GERUNDENSE Y SUS POSIBILIDADES INDUSTRIALES

Por ARTURO REBOLLO  
Ing. de Caminos, Canales y Puertos

*El presente estudio fue presentado al I Premio Luxan recientemente instituido por la Compañía Española de Puzolanas, S. A., con el fin de estimular la investigación realizada en nuestro país sobre la puzolana y los cementos puzolánicos.*

Este trabajo lo hemos redactado como consecuencia de las numerosas pruebas y ensayos que durante los años 1963 y 1964 realizamos con motivo de estudiar el cemento a emplear en una de las obras hidráulicas de Hidroeléctrica de Cataluña, S. A. Una parte de estas pruebas y ensayos lo dedicamos a la investigación de diversos cementos puzolánicos obtenidos, bien con los residuos procedentes de centrales térmicas, bien con cenizas naturales de piedra pómez de origen volcánico, proporcionando unos datos y unos resultados de gran interés, no solamente en el aspecto puramente científico, sino también en el industrial y económico.

La explotación de las cenizas naturales de piedra pómez de origen volcánico se viene utilizando en diversos países en virtud de las propiedades puzolánicas que suelen presentar, diferentes en cada caso, para su empleo en la fabricación del cemento puzolánico.

Las cenizas volcánicas que en innumerables yacimientos se encuentran en las estribaciones pirenaicas de la provincia de Gerona tienen en la actualidad una utilización muy restringida en tal sentido, no habiendo hallado unos análisis y ensayos rigurosos que nos sirvieran de base para plantear el problema. Por ello, este trabajo ha consistido, en primer lugar, en analizar con gran detalle sus propiedades físicas y químicas; en segundo lugar en comprobar, con gran amplitud, el comportamiento de diversos cementos puzolánicos preparados con ellas, colaborando eficazmente en toda esta tarea los ingenieros G. Lis, J. A. Granda y R. Marzo.

## 1. La piedra pómez volcánica del pre-Pirineo gerundense.

### 1.1. Yacimientos.

Se hallan situados al norte de la provincia, abarcando una amplísima zona desde las proximidades de Gerona hasta las comarcas de Olot y Ripoll.

Geológicamente estos yacimientos tienen su origen en las erupciones cuaternarias que tu-

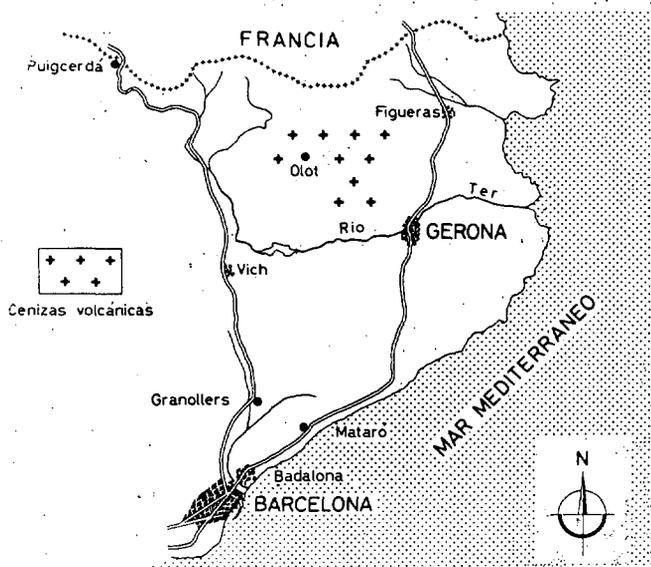


Fig. 1.<sup>a</sup> — Situación general de los yacimientos de cenizas volcánicas.

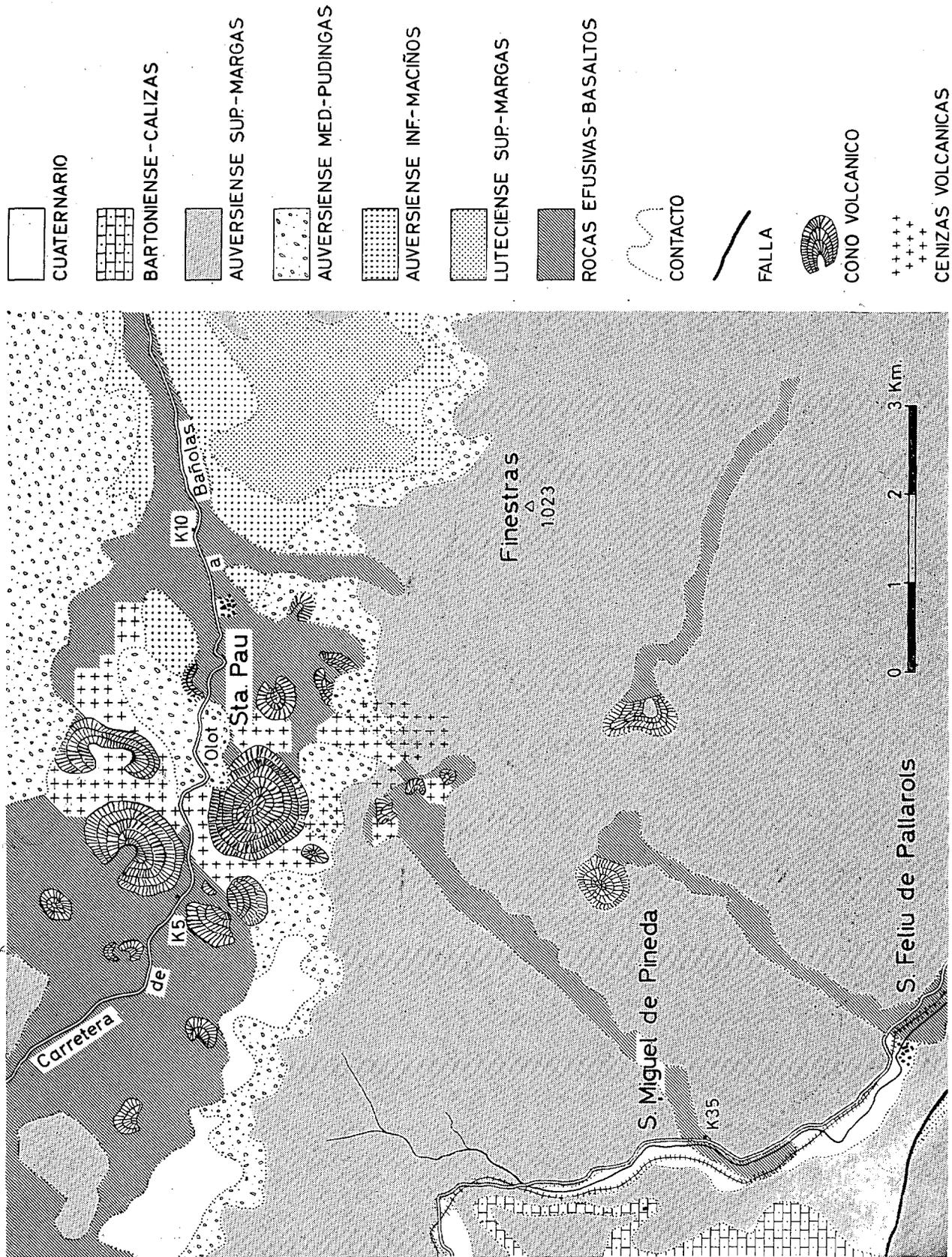


Fig. 2.<sup>a</sup> — Yacimientos de cenizas volcánicas en la comarca de Olot. Plano Geológico.

vieron lugar en aquella región y que atravesaron las formaciones margosas y calizas del eoceno marino, plegado contra la cadena axial pirenaica. Están formados por sedimentación eólica de las cenizas y los lapilli volcánicos, siendo su potencia del orden de 50 metros, condicionando todo ello una homogeneidad y un volumen ver-

## 1.2. Toma de muestras.

Hemos recogido 16 muestras en diversos yacimientos próximos a los kilómetros 6 y 8 de la carretera de Olot a Bañolas, en las inmediaciones de Santa Pau, cada una con pesos que oscilaban entre los 3,5 y 5 kilogramos.

Estas muestras las enviamos al Instituto

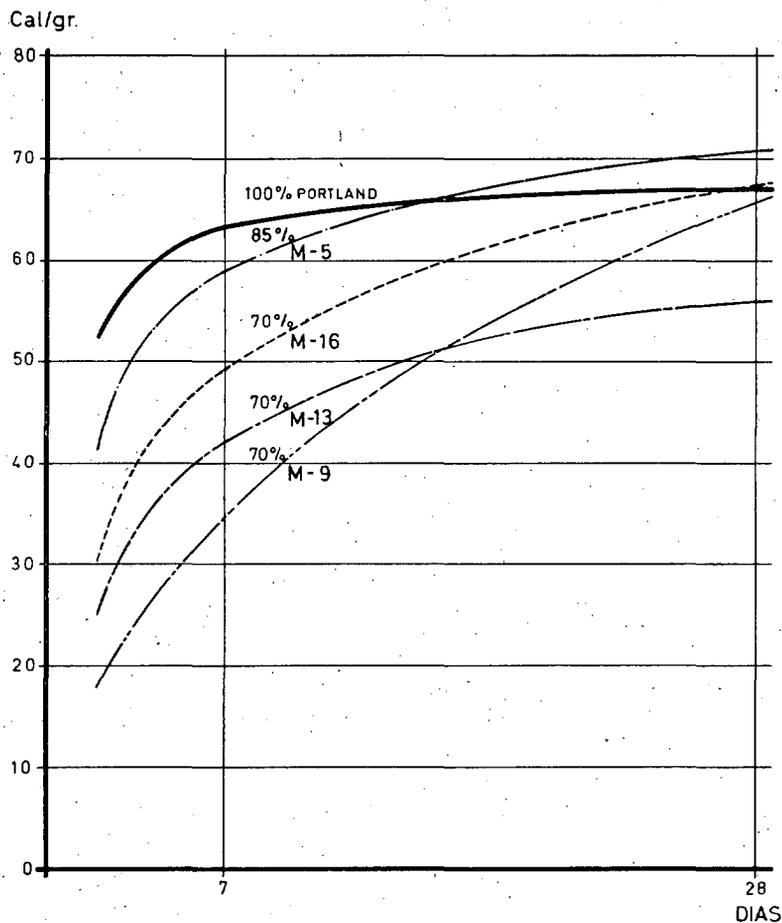


Fig. 3.<sup>a</sup> — Calor de hidratación del cemento portland empleado y de diversos cementos puzolánicos con diferentes muestras y porcentajes de puzolana.

daderamente sorprendente con vistas a su utilización industrial.

Actualmente dichos yacimientos forman, en su mayor parte, extensos campos de labor, en manos de particulares, algunos de los cuales han abierto pequeñas canteras para utilizar dichas cenizas y lapilli como gravilla para firmes de las carreteras locales, si bien su aprovechamiento racional como puzolana está ya planteado por un grupo de sociedades.

Eduardo Torroja, donde se realizaron los análisis de sus propiedades físicas, químicas y los ensayos de los cementos puzolánicos.

## 1.3. Propiedades físicas.

### 1.3.1. Humedad.

Las referidas 16 muestras de puzolana se secaron en una instalación de tubos de calefacción infrarroja, determinándose su humedad con

los siguientes resultados referidos a muestra húmeda:

	%
Muestra núm. 1 .....	14,2
Muestra núm. 2 .....	11,6
Muestra núm. 3 .....	11,5
Muestra núm. 4 .....	22,4
Muestra núm. 5 .....	10,1
Muestra núm. 6 .....	16,1
Muestra núm. 7 .....	15,3
Muestra núm. 8 .....	8,4
Muestra núm. 9 .....	7,3
Muestra núm. 10 .....	9,3
Muestra núm. 11 .....	16,0
Muestra núm. 12 .....	11,2
Muestra núm. 13 .....	8,5
Muestra núm. 14 .....	11,4
Muestra núm. 15 .....	15,0
Muestra núm. 16 .....	15,6
Media .....	12,7

Estos resultados condicionan de entrada un dispositivo de secado para rebajar a un valor no superior al 1 por 100 la del contenido en el molino, que es el normal en los de cemento portland artificial.

### 1.3.2. Peso específico y superficie específica.

Cada una de las muestras secas se desmenuzó en una pequeña trituradora de mandíbulas hasta tamaños inferiores a 5 mm. Posteriormente se hizo la molturación, siguiendo un método análogo al empleado en la práctica industrial.

El control final de finura se realizó en el permeabilímetro Blaine, con los siguientes resultados:

	Peso específico real (gr./cm. <sup>3</sup> )	Superficie específica (cm. <sup>2</sup> /gr.)
Muestra núm. 5 ...	2,75	6 242
Muestra núm. 9 ...	2,82	5 809
Muestra núm. 13 ...	2,83	4 338
Muestra núm. 16 ...	2,91	4 902

### 1.4. Propiedades químicas.

La composición química de las 16 muestras de puzolana la resumimos en el cuadro siguiente. El ataque y disolución de las muestras se efectuó mediante fusión alcalina, habiéndose realizado los análisis según la *Guía para el análisis químico de rocas*, de Jacob.

Los resultados están referidos a muestras secas 105-110° C., y confirman unos porcentajes óptimos y sumamente homogéneos en la composición de esta piedra pómez para su empleo como puzolana:

Determinación	M U E S T R A																Media
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
Pérdida al fuego	4,07	3,46	2,40	2,62	3,43	1,07	5,78	0,82	2,31	Aum.	Aum.	Aum.	Aum.	0,45	1,45	0,84	1,80
RI	0,32	0,60	0,25	0,19	0,44	0,30	0,18	0,26	0,19	0,17	0,35	0,19	0,19	0,37	0,14	0,30	0,26
SiO <sub>2</sub>	41,21	42,12	41,01	40,95	43,54	44,97	43,21	44,36	44,08	44,45	44,41	44,25	44,36	42,93	43,47	43,75	43,32
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18,29	18,05	16,86	17,69	17,65	17,64	16,84	17,29	17,88	18,30	18,78	18,44	18,72	18,41	18,20	18,89	18,00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,46	12,59	13,02	12,48	12,80	12,76	12,57	13,22	12,34	12,70	12,77	13,17	12,37	13,67	13,42	12,96	12,90
CaO	6,74	7,18	7,18	7,33	7,75	10,00	9,81	10,01	9,59	10,06	9,80	9,90	10,01	10,09	9,01	9,89	9,02
MgO	10,57	10,68	10,89	10,75	10,79	9,31	9,28	9,55	9,32	9,81	9,49	9,68	9,58	9,75	9,33	9,37	9,88
SO <sub>3</sub>	—	—	—	—	1,05	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0,06
S. D.	5,34	5,32	8,39	7,99	2,55	3,95	2,33	4,49	4,29	4,51	4,75	4,21	4,77	4,33	4,98	4,00	4,76
Total .....	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—	100,—

## 2. Ensayos de cementos puzolánicos.

Con las anteriores muestras haciéndolas servir como puzolana, hemos preparado una serie de cementos puzolánicos cuyos ensayos físicos y mecánicos vamos a referir a continuación.

### 2.1. Cemento portland empleado.

Ha sido del tipo P-250 de la fábrica de Vallcarca (Barcelona) de Cementos Fradera, S. A.

Su composición química, realizada sobre muestra desecada a 110-115° C., de acuerdo con el método establecido en el pliego general de condiciones vigentes, ha dado los siguientes resultados:

Determinación	MUESTRAS		
	a	b	c
	% en peso		
P. F.	4,66	4,61	4,60
SiO <sub>2</sub>	19,47	19,36	19,34
R. I.	1,14	1,13	1,21
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6,52	6,59	6,51
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2,51	2,49	2,51
CaO	61,27	61,68	61,41
MgO	1,48	1,31	1,32
SO <sub>3</sub>	1,73	1,69	1,76
S. D.	1,22	1,14	1,34
TOTAL .....	100,00	100,00	100,00
Cal libre (método glicerina) .....	1,96	1,64	1,67

La determinación de la humedad dio un 0,6 por 100 referido a muestra húmeda a 105-110° C.; su peso específico, 3,06 gr./cm.<sup>3</sup>, y en cuanto a su grado de finura, la superficie específica, según el permeabilímetro Blaine, resultó ser de 3 284 cm.<sup>2</sup>/gr.

En resumen, se trata de un cemento portland normal que cumple perfectamente con el pliego vigente.

### 2.2. Preparación de los cementos puzolánicos.

Con las muestras de puzolana números 5, 9, 13 y 16 se han preparado 20 cementos puzolánicos, cinco con cada una de las puzolanas, en las siguientes proporciones de cemento portland; realizándose la homogenización del portland y puzolana en una mezcladora de gran número de revoluciones:

	Cemento portland	Puzolana
Cemento puzolánico (1) .....	85 %	15 %
Cemento puzolánico (2) .....	80 %	20 %
Cemento puzolánico (3) .....	75 %	25 %
Cemento puzolánico (4) .....	70 %	30 %
Cemento puzolánico (5) .....	65 %	35 %

### 2.3. Consistencia normal.

De acuerdo con lo especificado en el "Pliego General de Condiciones para Conglomerantes Hidráulicos" vigente, los resultados han sido los siguientes:

Cemento portland	23,8 %	Cemento 13-1	24,0 %
Cemento 5-1	24,0 %	Cemento 13-2	24,2 %
Cemento 5-2	24,0 %	Cemento 13-3	24,4 %
Cemento 5-3	24,0 %	Cemento 13-4	24,6 %
Cemento 5-4	24,0 %	Cemento 13-5	24,8 %
Cemento 5-5	24,0 %	Cemento 16-1	23,9 %
Cemento 9-1	24,2 %	Cemento 16-2	24,1 %
Cemento 9-2	24,5 %	Cemento 16-3	24,2 %
Cemento 9-3	24,9 %	Cemento 16-4	24,4 %
Cemento 9-4	25,2 %	Cemento 16-5	24,6 %
Cemento 9-5	25,6 %		

que indican unos valores totalmente análogos a los del portland.

### 2.4. Tiempo de fraguado.

De acuerdo con lo especificado en el Pliego Oficial, los resultados han sido:

	Principio	Final	Intervalo
Cemento portland...	2 h. 5 m.	3 h. 30 m.	1 h. 25 m.
Cemento 5-1 .....	1 h. 25 m.	3 h. 55 m.	2 h. 30 m.
Cemento 5-2 .....	1 h. 10 m.	3 h. 35 m.	2 h. 25 m.
Cemento 5-3 .....	1 h. 10 m.	3 h. 35 m.	2 h. 25 m.
Cemento 5-4 .....	1 h. 10 m.	3 h. 30 m.	2 h. 20 m.
Cemento 5-5 .....	1 h. 55 m.	3 h. 40 m.	1 h. 45 m.
Cemento 9-1 .....	2 h. 15 m.	3 h. 40 m.	1 h. 25 m.
Cemento 9-2 .....	2 h. 25 m.	3 h. 55 m.	1 h. 30 m.
Cemento 9-3 .....	2 h. 35 m.	4 h. 30 m.	1 h. 30 m.
Cemento 9-4 .....	2 h. 50 m.	4 h. 25 m.	1 h. 35 m.
Cemento 9-5 .....	2 h. 55 m.	4 h. 30 m.	1 h. 35 m.
Cemento 13-1 .....	3 h.	4 h. 15 m.	1 h. 15 m.
Cemento 13-2 .....	2 h. 55 m.	4 h. 20 m.	1 h. 25 m.
Cemento 13-3 .....	2 h. 50 m.	4 h. 25 m.	1 h. 35 m.
Cemento 13-4 .....	3 h. 05 m.	4 h. 25 m.	1 h. 20 m.
Cemento 13-5 .....	2 h. 55 m.	4 h. 30 m.	1 h. 35 m.
Cemento 16-1 .....	2 h. 55 m.	4 h. 30 m.	1 h. 35 m.
Cemento 16-2 .....	2 h. 55 m.	4 h. 20 m.	1 h. 25 m.
Cemento 16-3 .....	2 h. 55 m.	4 h. 25 m.	1 h. 30 m.
Cemento 16-4 .....	2 h. 50 m.	4 h. 40 m.	1 h. 50 m.
Cemento 16-5 .....	3 h. 5 m.	4 h. 45 m.	1 h. 40 m.

que garantizan un fraguado perfectamente normal.

## 2.5. Estabilidad de volumen (autoclave).

Cemento portland .....	0,283 % expansión
Cemento 5-1 .....	0,143 % expansión
Cemento 5-3 .....	0,045 % expansión
Cemento 5-5 .....	0,081 % expansión
Cemento 9-1 .....	0,141 % expansión
Cemento 9-3 .....	0,112 % expansión
Cemento 9-5 .....	0,110 % expansión
Cemento 13-1 .....	0,158 % expansión
Cemento 13-3 .....	0,128 % expansión
Cemento 13-5 .....	0,123 % expansión
Cemento 16-1 .....	0,138 % expansión
Cemento 16-3 .....	0,111 % expansión
Cemento 16-5 .....	0,115 % expansión

Estos resultados, que expresan el valor medio de cuatro determinaciones, confirman el efecto sumamente favorable de la puzolana al reaccionar con los elementos libres del portland.

## 2.6. Calor de hidratación.

Las determinaciones del calor de hidratación se han efectuado para el cemento portland siguiendo la técnica operatoria y los métodos de cálculo prescritos en la norma ASTM C.186-55, y para los cementos puzolánicos siguiendo el proyecto de norma propuesta por el CEMBU-REAU en 1964. Los resultados han sido los siguientes:

MUESTRA	Calor hidratación cal./gr.	
	7 días	28 días
Cemento portland.	63,6	67
Puzolánico 5-1.	59	70,8
Puzolánico 9-4.	34,7	65,7
Puzolánico 13-4.	42	56
Puzolánico 16-4.	49,3	67,3

que confirman el efecto altamente favorable de la puzolana para rebajar la temperatura inicial de la puesta en obra del hormigón, sobre todo si se emplea en grandes masas.

## 2.7. Ensayo mecánico acelerado.

Hemos realizado este ensayo a fin de comprobar el grado de actividad de la puzolana con rapidez, conservando las probetas, una vez desmoldadas durante cuatro días en agua a 50° C., enfriándolas progresivamente al cabo de dicho tiempo hasta alcanzar los 20° C., después de

cinco horas. Se obtuvieron los siguientes resultados:

Cemento	COMPRESION (Kg./cm. <sup>2</sup> )		FLEXOTRACCION (Kg./cm. <sup>2</sup> )	
	Máxima de 6 probetas	Media	Máxima de 6 probetas	Media
Portland	296,0	293,3	57,0	55,2
5-1	296,0	285,8	59,0	54,7
5-2	283,0	274,8	58,0	55,7
5-3	274,0	270,0	60,5	57,8
5-4	282,0	269,3	57,5	54,8
5-5	253,0	249,3	60,5	57,9
9-1	285,0	277,5	54,7	54,2
9-2	274,0	265,6	56,0	53,3
9-3	266,0	255,1	53,5	50,9
9-4	253,0	245,6	51,7	49,2
9-5	241,0	230,5	48,7	47,6
13-1	300,0	286,1	60,7	59,0
13-2	296,0	289,5	63,2	61,9
13-3	304,0	296,0	70,0	69,0
13-4	300,0	293,8	71,2	69,7
13-5	311,0	298,1	76,2	74,0
16-1	281,0	268,3	56,2	54,1
16-2	262,0	251,1	52,2	51,8
16-3	253,0	246,8	53,2	51,4
16-4	249,0	240,3	51,7	50,0
16-5	235,0	223,0	52,2	51,6

Estos datos son suficientemente elocuentes para detectar el elevado grado de actividad de estas cenizas. El 75 por 100 de los valores a compresión son solamente un 10 por 100 inferiores a los del portland, mientras que el 25 por 100 restante los iguala. Más determinantes son los resultados a flexotracción, donde los valores del cemento puzolánico igualan prácticamente y superan en el 35 por 100 de los casos obtenidos con el portland.

## 2.8. Resistencias mecánicas a flexotracción y compresión en mortero normal a los 3, 7, 28, 90, 180 y 360 días.

No obstante haber realizado el ensayo anterior, totalmente indicativo, hemos llevado a cabo sistemáticamente los ensayos mecánicos tipo a flexotracción y compresión de diversos cementos puzolánicos preparados con las muestras M-5-9-13 y 16, incluyendo también los relativos al cemento portland. Los hemos reflejado en los gráficos adjuntos, donde se puede observar con gran calidad cómo el 65 por 100 de las roturas a flexotracción de los cementos puzolánicos alcanzan a las del portland a los seis meses, su-

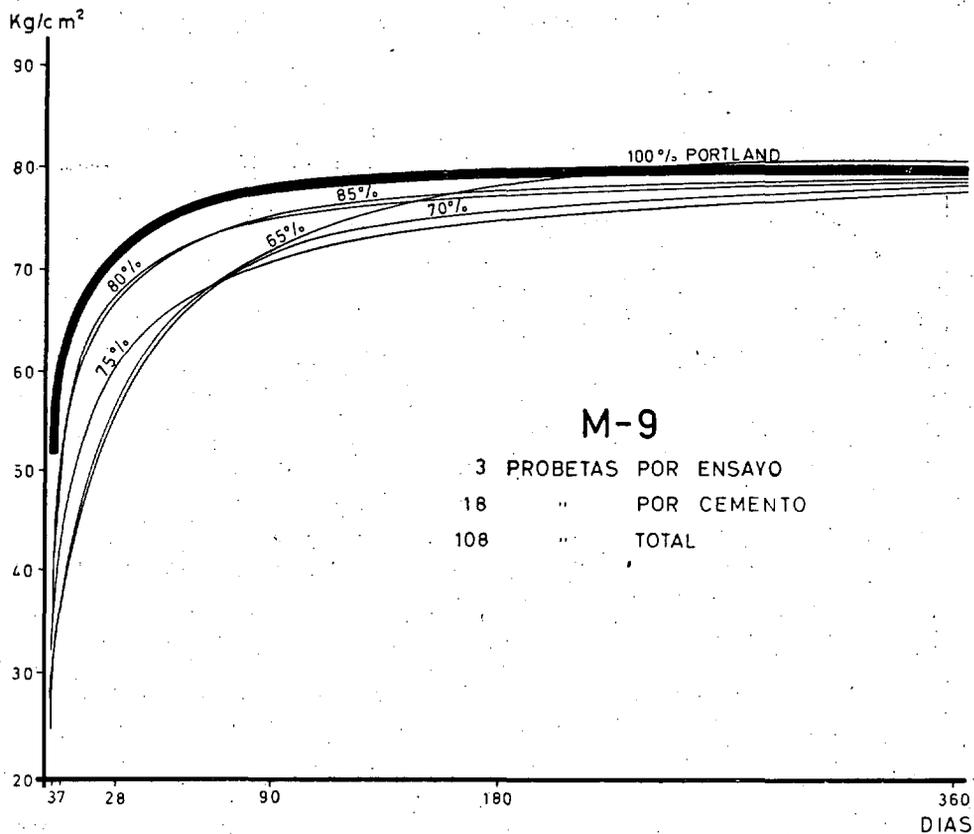
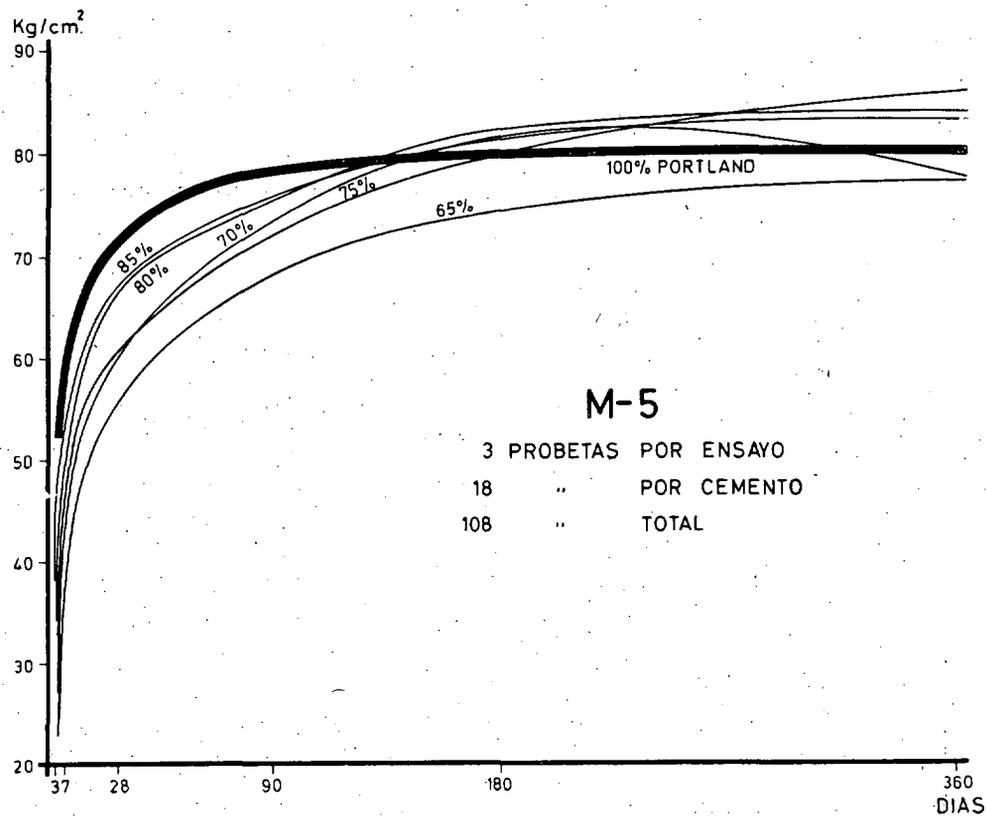


Fig. 4.<sup>a</sup>—Puzolanas M-5-9. Curvas características de los ensayos a flexotracción realizados con diversos cementos puzolánicos.

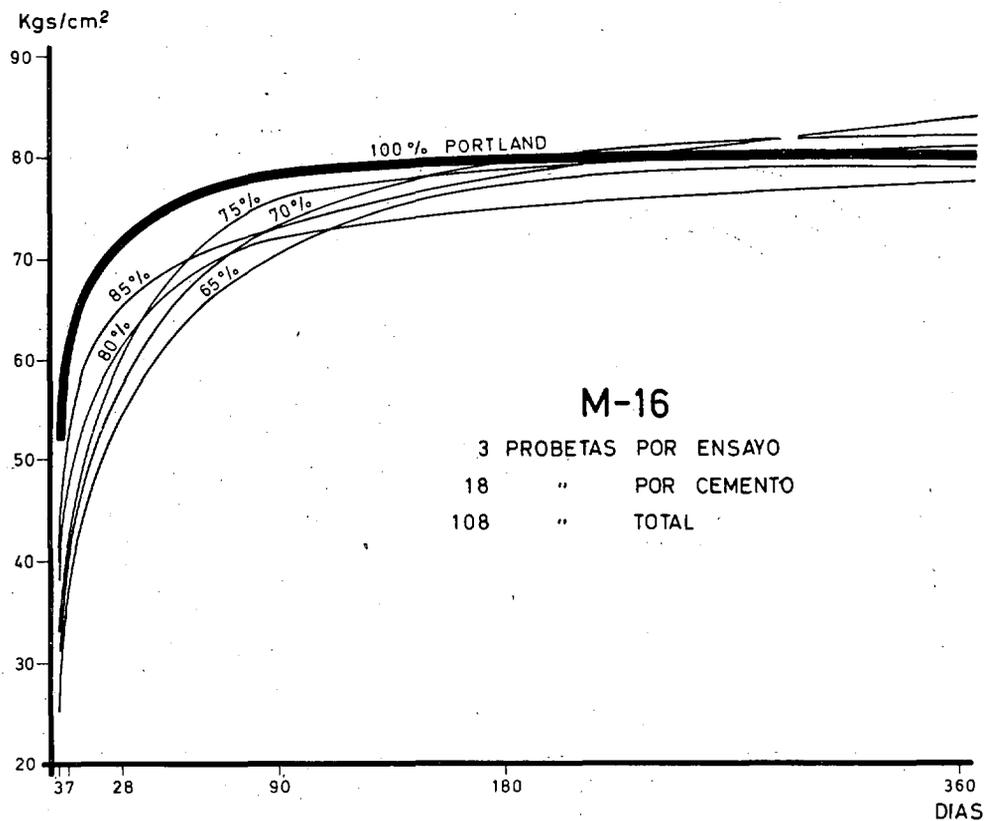
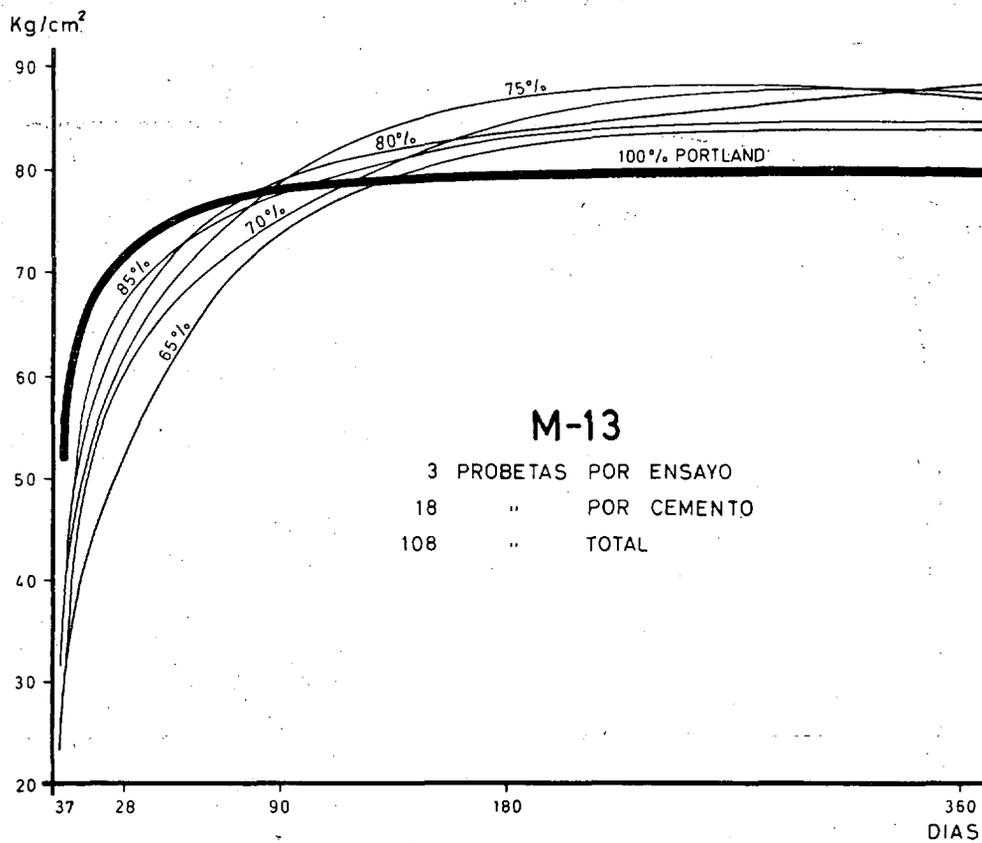


Fig. 5.<sup>a</sup> — Puzolanas M-13-16. Curvas características de los ensayos a flexotracción realizados con diversos cementos puzolánicos.

perándolas a partir de ese tiempo incluso por algún cemento puzolánico que tiene un 35 por 100 de puzolana. Esta capacidad mecánica para la rotura a flexotracción es, en nuestra opinión, el mejor índice de la calidad obtenida con el empleo de estas cenizas.

También exponemos las curvas características globales de todos los resultados a flexotracción y compresión. Estas últimas se van acercando paulatinamente a las del portland, siendo a los veintiocho días un 10 a un 40 por 100 inferior; a los noventa días solamente un 5 a un

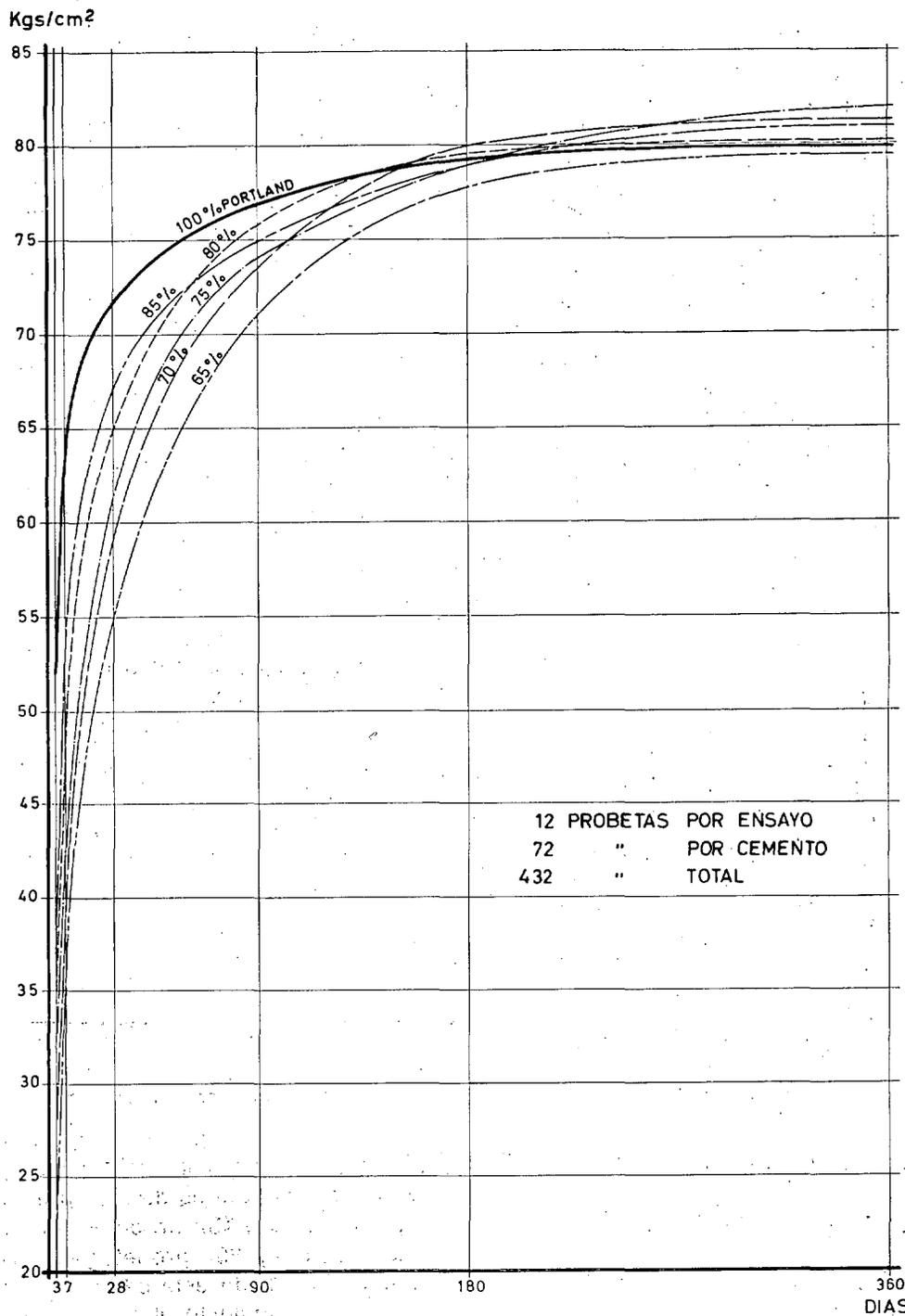


Fig. 6.<sup>a</sup>— Curvas características de los ensayos globales a flexotracción realizados con diversos cementos puzolánicos.

20 por 100 inferiores; mientras que al año las resistencias medias mínimas a compresión de los cementos puzolánicos son solamente un 10 por 100 inferiores a las del portland, siendo

las resistencias medias máximas prácticamente iguales, todo lo cual nos confirma plenamente el enorme interés que puede tener la utilización de estos materiales.

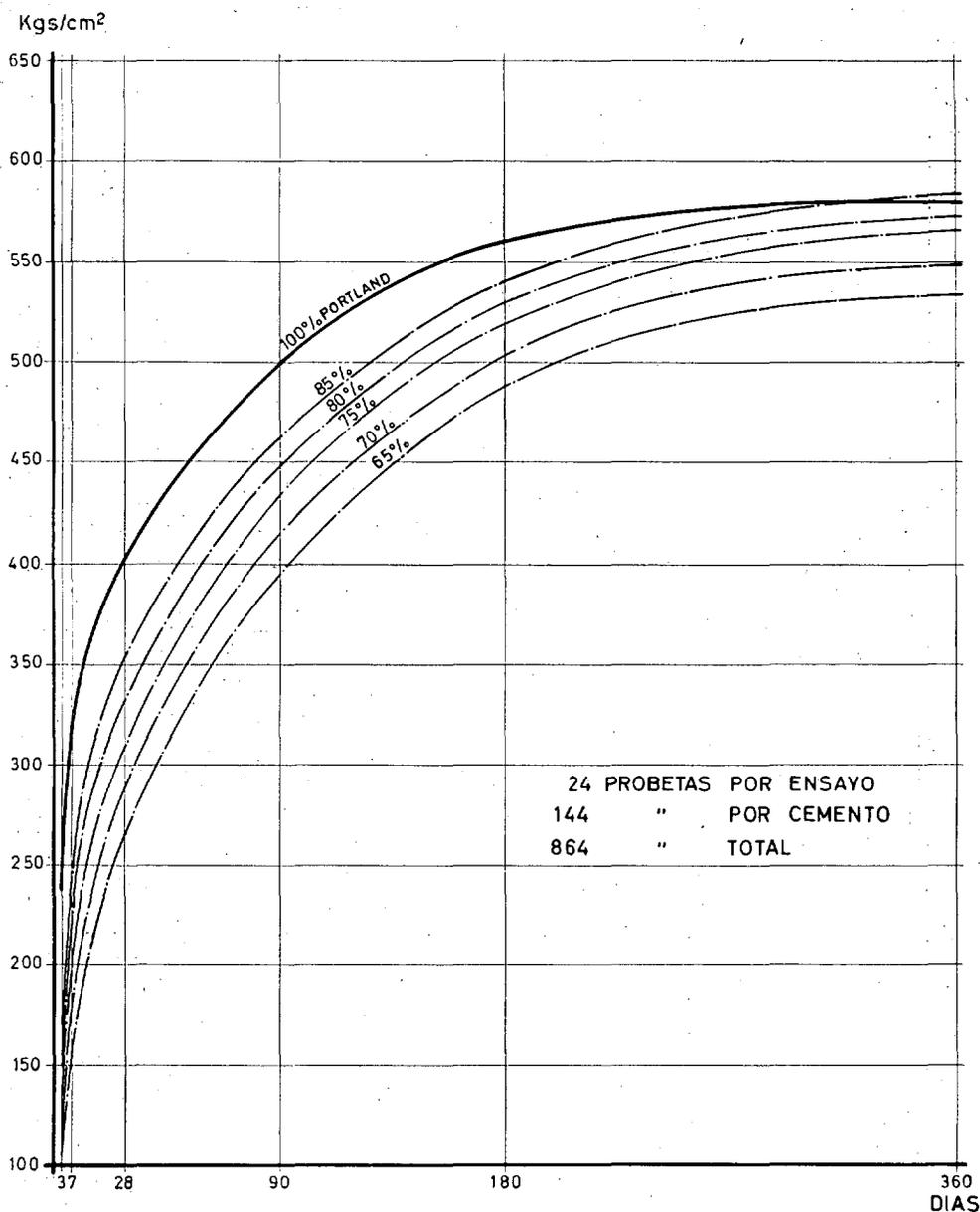


Fig. 7.<sup>a</sup> — Curvas características de los ensayos globales a compresión realizados con diversos cementos puzolánicos.

### 3. Consideraciones generales.

#### 3.1. Calidad y economía del producto.

En los estudios y ensayos anteriores nos hemos referido con amplitud a las propiedades físicas y químicas, tanto de la puzolana como de

los cementos puzolánicos, siendo además apoyados con las roturas de 252 probetas en el ensayo acelerado, 432 probetas en los ensayos a flexotracción y 864 probetas en los ensayos a compresión. Todo este caudal de resultados ha puesto de manifiesto el elevado grado de actividad de estas puzolanas, que garantizan, ade-

más, unas resistencias para el cemento puzolánico incluso mejores que las del propio cemento portland, unido todo ello a la mejora indudable de su estabilidad química y a la reducción de su calor inicial de fraguado, hacen que este cemento puzolánico sea un producto ideal para obras de hormigón en masa como las presas, canales, túneles, obras marítimas y sobre todo para obras sometidas a las aguas agresivas.

Aparte de todo ello pueden llegar a sustituir hasta un 35 por 100 del peso en la dosificación de cemento, con lo que se puede llegar a introducir una economía en el empleo de este producto, puesto que la elaboración industrial de la puzolana molida es evidentemente menos costosa que la del cemento portland, a pesar de que haya que someterla inicialmente, según hemos comprobado por los estudios anteriores, a un proceso de secado hasta rebajar su humedad a un valor inferior al 1 por 100, y posteriormente a un proceso de molido hasta reducir su finura a la exigida para el portland. No obstante, al comparar las instalaciones que precisa la fabricación del portland con las que precisaría la fabricación de esta puzolana, teniendo en cuenta que los procesos de transporte, molido y ensilado son prácticamente análogos, y que todo el proceso del horno y de la preparación de los materiales calizos y arcillosos no existe en la elaboración de esta última, podemos afirmar que el precio del producto industrial neto permite una rentabilidad muy interesante.

### 3.2. Otras posibilidades.

En el epígrafe 1.1. hemos indicado cómo los yacimientos de estas cenizas se hallan adyacentes a las formaciones margosas y calizas del

eocono marino, siendo perfectamente posible encontrar numerosos yacimientos, en los que las proporciones de los materiales calizos y arcillosos tengan la composición idónea para obtener a escala industrial el cemento portland.

Pues bien, dadas las óptimas condiciones que hemos observado en las cenizas volcánicas para su utilización como puzolana, sería posible obtener, partiendo de minas situadas en el mismo punto, un cemento puzolánico con características inmejorables a base de montar instalaciones paralelas que suministrasen de un lado el portland y de otro la puzolana, en cuyo proceso final de fabricación se obtuviesen el producto mezclado y homogéneo.

A pesar de que las actuales tendencias de la producción nacional de cemento portland superan la demanda, sin embargo la producción de cemento puzolánico, que prácticamente no se produce a escala industrial en nuestro país, salvo en Canarias y la zona centro, podría presentar en este caso un interés excepcional, no sólo porque técnicamente sería recomendable en infinidad de construcciones, según hemos señalado, sino también porque económicamente sería competitivo con el cemento portland de que hoy día forzosamente tiene que abastecerse el mercado.

Con ello solamente hemos querido esbozar esta idea, que podría ser fácilmente apoyada por un estudio técnico y económico del problema y cuyo desarrollo se nos sale fuera de los límites y objeto de este trabajo, idea que precisamente ha tenido su primer fundamento en los resultados de los estudios y ensayos que hemos realizado con estas cenizas de piedra pómez.