

607-6

curado a diferentes temperaturas de mezclas de arena-cal-cenizas volantes

MAÑUEL MATEOS, I. C., M. S. Ph. D

La cal y las cenizas volantes forman una mezcla puzolánica que se utiliza para estabilizar suelos en la construcción de bases y sub-bases de pavimentos; y las cenizas volantes solas se usan como puzolana en el hormigón.

El ritmo del desarrollo de la reacción puzolánica entre la cal y las cenizas volantes se sabe que depende de la temperatura de curado, pero se desconoce la influencia de los distintos tipos de cal y clases de cenizas.

En esta comunicación se presentan las resistencias obtenidas con mezclas de arena, cal y cenizas volantes utilizando ocho cenizas y dos cales y curando las probetas a varias temperaturas.

De los distintos tipos de cal las vivas no se emplean corrientemente con cenizas y de las hidratadas, la dolomítica dihidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{Mg}(\text{OH})_2$, no reacciona tan bien como la monohidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{MgO}$ (Ref. 1). Por esto se utilizó sólo esta última entre las dolomíticas. La otra cal usada fue la calcítica hidratada, $\text{Ca}(\text{OH})_2$.

En el cemento portland se admite sólo una pequeña cantidad de óxido de magnesio; sin embargo, cuando se usan puzolanas con el cemento, el óxido de magnesio se puede combinar con las puzolanas para formar silicatos de magnesio estables, siendo tal vez menos crítica la presencia de cantidades de óxido de magnesio mayores que la mínima establecida. La influencia comparativa de las dos cales puede aportar alguna indicación sobre el papel del óxido de magnesio en la reacción puzolánica.

materiales

Suelo

Se seleccionó una arena de duna, limpia, indicándose sus características en la Tabla 1.

TABLA 1. Descripción y propiedades de la arena

Localidad	Benton Country, Iowa
Descripción geológica	Arena eólica, período glacial Wisconsinian, oxidada, lixiviada
Horizonte edáfico	C, series Carrington
Profundidad, m	2-3
Composición textural (%)	
Grava (2 mm)	0
Arena (2 a 0,074 mm)	95,5
Limo (0,074 a 0,005 mm)	1,5
Arcilla (0,005 mm)	3,0
Coloides (0,002 mm)	2,6
Plasticidad	No plástica
Clasificación AASHO	A-3 (o)
Intercambio de cationes, me/100 g	1
pH	6,6
Carbonatos (%)	0,4
Materia orgánica	0,1
Mineral arcilloso	Montmorillonita

Cenizas volantes

Se seleccionaron ocho cenizas para tener variaciones importantes en este material.

N.º 1: recogida, en ciclones múltiples y precipitadores eléctricos; el carbón, del norte de West Virginia, fue pulverizado hasta pasar el 70 % por el tamiz 200 (apertura 0,074 mm). La muestra era de la planta de la compañía Detroit Edison, en St. Clair, Michigan.

N.º 2: recogida, mecánicamente, de carbón, del norte de Illinois, quemado en una caldera Babcock & Wilcox. La muestra provenía de la planta Sixth Street, Cedar Rapids, Iowa, de la compañía Iowa Electric Light and Power Co.

N.º 3: recogida, en precipitadores eléctricos, de carbón, del oeste de Kentucky, quemado en una caldera de fondo seco. La muestra procedía de la planta Paddy's Run, Louisville, Ky., de la Louisville Gas and Electric Co.

N.º 4: recogida, en precipitadores mecánicos, de carbón, del norte de Illinois, quemado en una caldera Springfield. La muestra procedía de la planta Sixth Street, Cedar Rapids, de la Iowa Electric Light and Power Co.

N.º 5: recogida, en precipitadores mecánicos, tipo centrifugo, de carbón de Illinois. La muestra procedía de la planta Riverside Station, Davenport, de la Iowa-Illinois Gas and Electric Co.

N.º 6: recogida, en precipitadores mecánicos, tipo multicono, de carbón de Iowa, La muestra fue enviada por la planta de Des Moines de la Iowa Power and Light Co.

N.º 7: recogida, en precipitadores mecánicos, tipo multicono VGR, de carbón del sur de Illinois. La muestra fue enviada por la planta de Waterloo de la Iowa Public Service Co.

N.º 8: recogida, en precipitadores mecánicos, tipo ciclón, de carbón de varias minas en Kansas y Missouri, quemado en calderas Combustion Engineering. La muestra fue enviada por la planta Hawthorn de la Kansas City Power and Light Co.

TABLA 2. *Análisis de las cenizas volantes*

	N.º 1	N.º 2	N.º 3	N.º 4	N.º 5	N.º 6	N.º 7	N.º 8
Origen	Michig.	Iowa	Ky.	Iowa	Iowa	Iowa	Iowa	Miss.
Mat. combustible (%).	3,9	7,2	2,6	18,6	0,7	0,2	13,9	3,8
Superficie específica, Blaine (cm ² /g) ...	2.820	2.663	3.226	4.550	576	1.460	4.240	2.048
Peso específico	2,58	2,39	2,60	2,37	3,43	2,82	2,34	2,68
Pasando tamiz 325...	91,8	49,8	86,1	54,9	22,6	31,8	54,9	64,8
Dióxido silicio (%).	43,5	36,7	42,5	36,2	11,3	40,1	38,5	35,3
Oxido magnesio (%).	0,2	1,0	0,8	0,9	0,3	0,3	0,2	0,9
Oxido calcio (%).	2,9	3,5	5,7	8,3	12,3	5,8	3,2	5,3
Oxido aluminio (%).	23,2	21,3	23,4	15,8	0,9	13,1	18,1	7,7
Oxido hierro (%).	24,8	24,3	20,0	16,7	68,4	36,7	16,2	43,3
Trióxido azufre (%).	0,8	2,0	2,3	1,5	3,2	2,4	1,1	1,4

Cales

Las cales, de tipo comercial, fueron suministradas por la compañía U. S. Gypsum. Una fue calcítica hidratada y la otra dolomítica monohidratada. Las propiedades están dadas en otra comunicación por Vincent, Mateos y Davidson (Ref. 2).

métodos

Mezclado y moldeo

Los materiales se emplearon en las proporciones de 76,5 % de arena, 17,5 % de cenizas y 6 % de cal. Se utilizó una cantidad elevada de cal para contrarrestar la influencia de la cal que pudiera haber presente en las cenizas (Ref. 3).

Los materiales se mezclaron en una mezcladora Hobart C-100, a baja velocidad, secos durante 30 s y 2 min después de haber añadido el agua requerida.

Se utilizó el aparato de compactación desarrollado en la universidad Iowa State para preparar probetas de 5,08 cm (2 pulgadas) de altura por 5,08 cm de diámetro, con densidad seca cercana a la máxima (Norma ASTM, D 558) (Ref. 4). Esta se consiguió aplicando cinco golpes a cada lado de la probeta con un pisón de 5 libras (2,268 kg) y caída de 12 pulgadas (30,48 cm).

Curado

Las probetas de cada mezcla se curaron a 10, 22, 40, 60 y 120° C. Las variaciones en temperatura eran de $\pm 2^\circ$ C. Para retener la humedad mejor y reducir la absorción de anhídrido carbónico, CO₂, de la atmósfera, las probetas se envolvieron en papel plástico de cloruro de polivinilidino y se sellaron con celofán antes de proceder al curado. Las probetas curadas a 40 y 60° C se metieron en recipientes herméticos con agua libre debajo de las probetas para asegurar un ambiente con alta humedad relativa. Las probetas curadas a 120° C se pusieron en autoclave con una presión de 1,06 atmósferas; el aumento en temperatura fue paulatino para prevenir que se formaran grietas en las probetas curadas en autoclave.

Rotura

Después de curadas, las probetas se sumergieron en agua destilada por 24 horas; se ensayaron entonces a compresión libre, rompiéndose tres probetas por punto, dándose la media.

resultados

Los resultados (figs. 1 a 16) ponen de manifiesto los beneficios que se obtienen cuando se aumenta la temperatura de curado de las mezclas de suelo-cal-cenizas. Se ve también que hay dos tendencias generales en las resistencias obtenidas, y que dependen del tipo de cal empleada.

Cal calcítica

Con esta cal el menor incremento en resistencia se encuentra entre 10 y 22° C, según se ve por la pequeña pendiente de las líneas que unen los valores entre dichos grados. La resistencia aumenta con un incremento mayor entre 22 y 40° C. A 40° C hay un quiebro en el aumento de la resistencia en función de la temperatura para probetas curadas durante 28 días. Entre 40 y 60° C, las probetas curadas durante 3 y 7 días muestran un alto incremento en la resistencia por grado de temperatura; las curadas 28 días ganan todavía resistencia, pero en menor proporción que las curadas a menores temperaturas. Entre 60 y 120° C sigue aumentando la resistencia, y por la forma de las curvas se puede deducir que aumentaría aún más para mayores temperaturas de curado.

Cal dolomítica

Las curas de resistencia en mezclas con cal dolomítica presentan una marcada diferencia con respecto a las hechas con la calcítica. Para las temperaturas más bajas es mayor el aumento en resistencia que con la cal calcítica, excepto con la ceniza N.º 5, la cual posee un alto contenido de hierro; a altas temperaturas, sin embargo, el aumento en la resistencia es menor.

Discusión

La actividad puzolánica entre la cal y las cenizas volantes está grandemente influenciada por la temperatura. Después de periodos de curado de 3 y 7 días fallaron durante el periodo de inmersión la mayor parte de las probetas curadas a 10° C, pero aquéllas curadas a 120° C desarrollaron resistencias que, con cenizas de alta calidad, son comparables a las obtenidas con el hormigón ordinario. A las temperaturas del medio ambiente dio la cal dolomítica monohidratada resistencias más altas que la cal calcítica, aunque a temperaturas de 60 y 120° C la calcítica fue siempre mejor que la dolomítica.

La influencia de las altas temperaturas en el desarrollo de la resistencia es de importancia en estabilización de suelos con cal y cenizas volantes, y pone de manifiesto la necesidad de llevar a cabo los trabajos de construcción al principio de verano en regiones con inviernos severos. Los suelos estabilizados tendrán entonces tiempo suficiente para curarse, durante varias semanas, a temperaturas lo suficientemente elevadas para ayudar en el desarrollo de una resistencia suficiente para soportar los efectos adversos de las bajas temperaturas del invierno. Las mezclas de suelo-cal-cenizas, curadas durante el verano, pueden desarrollar una resistencia dos veces mayor que la de mezclas colocadas al final del verano. Cuando la estabilización ha de hacerse en la última parte del verano o principio del otoño, se debe emplear la cal dolomítica monohidratada.

Se cree que el óxido de magnesio actúa en la reacción cal-cenizas, en parte, como un catalizador, y en parte, como un compuesto activo (Ref. 5). Partiendo de la base que el óxido de magnesio forma compuestos cristalinos con algunos minerales arcillosos (Ref. 6), es posible que se combine en forma cristalina en la reacción entre la cal dolomítica y las cenizas volantes. Las mayores resistencias obtenidas con la cal dolomítica, a las temperaturas ambientes, sugieren que el óxido de magnesio puede también contribuir al desarrollo de la resistencia a través de la formación de compuestos de magnesio cementicios.

La gran variación en actividad puzolánica de las distintas cenizas está reflejada en las resistencias obtenidas. La variación se ve más claramente para las altas temperaturas de curado. Las altas resistencias obtenidas con la ceniza N.º 3 no se pudieron relacionar con las características físicas o químicas particulares de esta ceniza. Sin embargo, las tres cenizas que dieron las más bajas resistencias a altas temperaturas de curado fueron aquéllas con los más altos contenidos de materia combustible; éstas son las cenizas N.ºs 4, 7 y 2, con 19, 14 y 7 % de materia combustible, respectivamente. Las resistencias obtenidas con estas cenizas a altas temperaturas de curado están en relación inversa con su contenido en materia combustible.

La ceniza N.º 5, que contiene principalmente compuestos de hierro, dio relativamente altas resistencias en mezclas con cal calcítica para altas temperaturas de curado.

conclusiones

Basándose en los resultados obtenidos en este trabajo, se presentan las siguientes conclusiones:

1. Para temperaturas de curado hasta 32° C en mezclas de arena-cal-cenizas volantes, se obtienen en general mayores resistencias usando cal dolomítica monohidratada que con cal calcítica hidratada.
2. Para temperaturas de curado entre 60 y 120° C, se obtienen mayores resistencias con cal calcítica hidratada que con cal dolomítica monohidratada.
3. La estabilización de suelos con cal y cenizas volantes debe hacerse, en climas fríos, al principio de verano para que gocen de altas temperaturas en las primeras semanas de curado.
4. Un alto contenido de materia combustible, parece ser un factor regresivo en la reacción cal-cenizas volantes para temperaturas de curado superiores a los 60° C.

referencias

1. J. W. H. WANG, M. MATEOS y D. T. DAVIDSON: *Comparative Effects of Hydraulic, Calcitic, and Dolomitic Limes, and Cement in Soil Stabilization*. Highway Research Record, N.º 29. Washington, 1963.
2. R. D. VINCENT, M. MATEOS y D. T. DAVIDSON: *Variation in Pozzolanic Behavior of Fly Ashes*, Proceedings Am. Soc. Testing Mat., Vol. 61, p. 1094. 1961.
3. M. MATEOS: *Soil Stabilization with Fly Ash Alone*, Highway Research Record, N.º 52. Washington. 1964.
4. Methods of Test for Moisture-Density Relations of Soil-Cement Mixtures (D 558), 1964 Book of ASTM Standards, Part 11.
5. M. MATEOS y D. T. DAVIDSON: *Steam Curing and X-ray Studies of Fly Ashes*, Proceedings, Am. Soc. Testing Matls., Vol. 62, p. 1015. 1962.
6. M. MATEOS y D. T. DAVIDSON: *Further Evaluation of Promising Chemical Additives for Accelerating Hardening of Soil-Lime-Fly Ash Mixtures*, Highway Research Board Bulletin, N.º 304, p. 32. 1961.

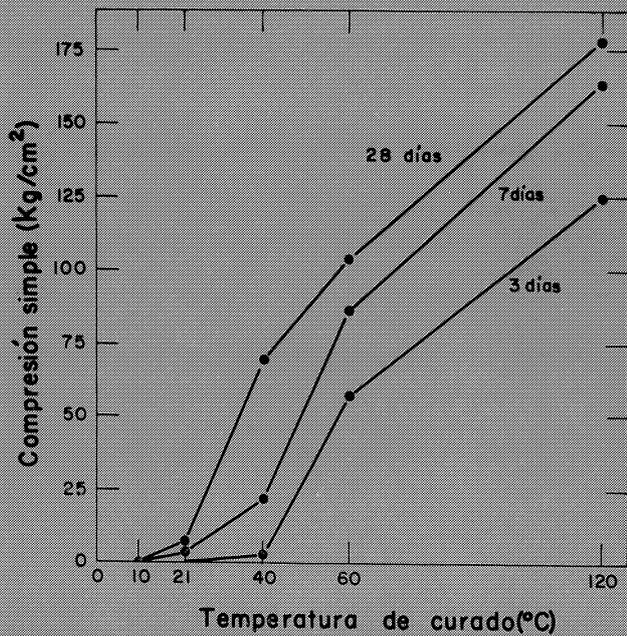


Fig. 1.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal calcítica hidratada y cenizas volantes No. 1.

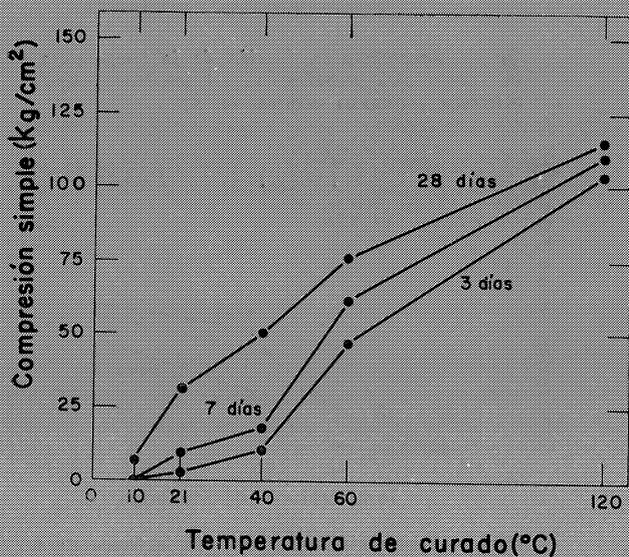


Fig. 2.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal dolomítica monohidratada y cenizas volantes No. 1.

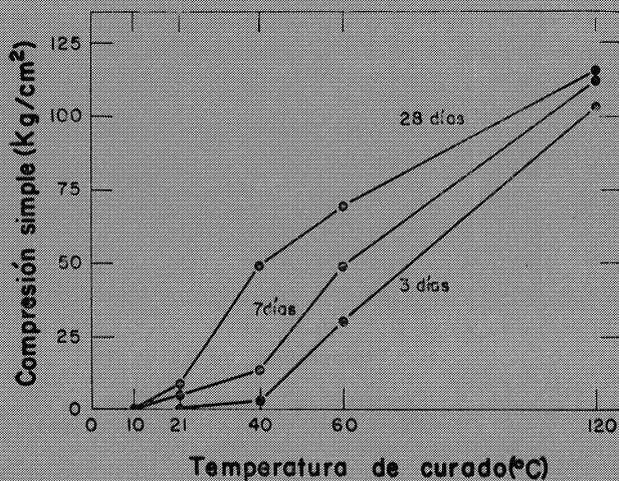


Fig. 3.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal calcítica hidratada y cenizas volantes No. 2.

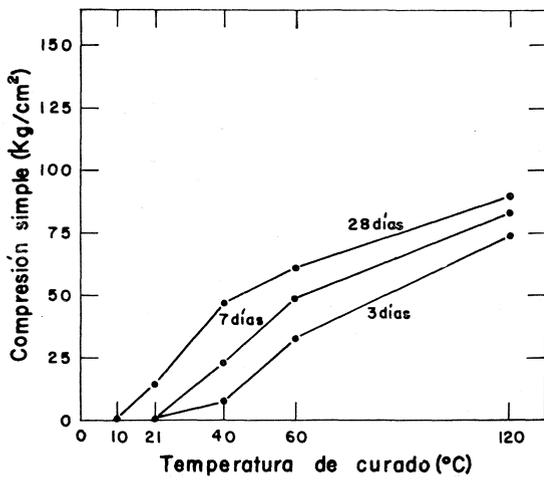


Fig. 4.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal dolomítica monohidratada y cenizas volantes No. 2.

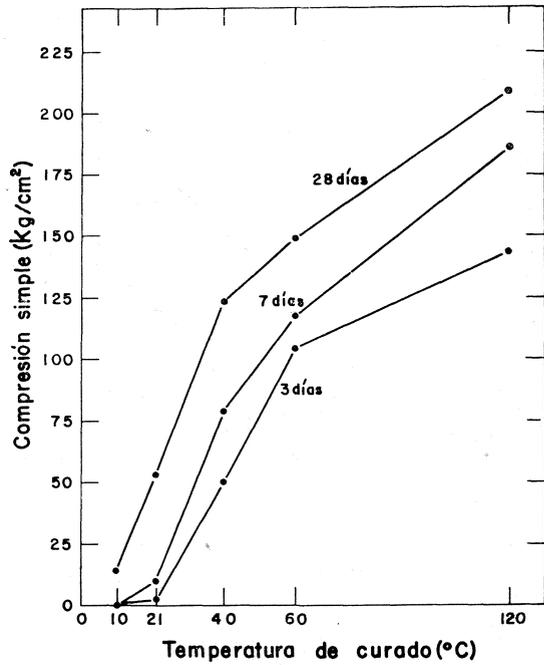


Fig. 6.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal dolomítica monohidratada y cenizas volantes No. 3.

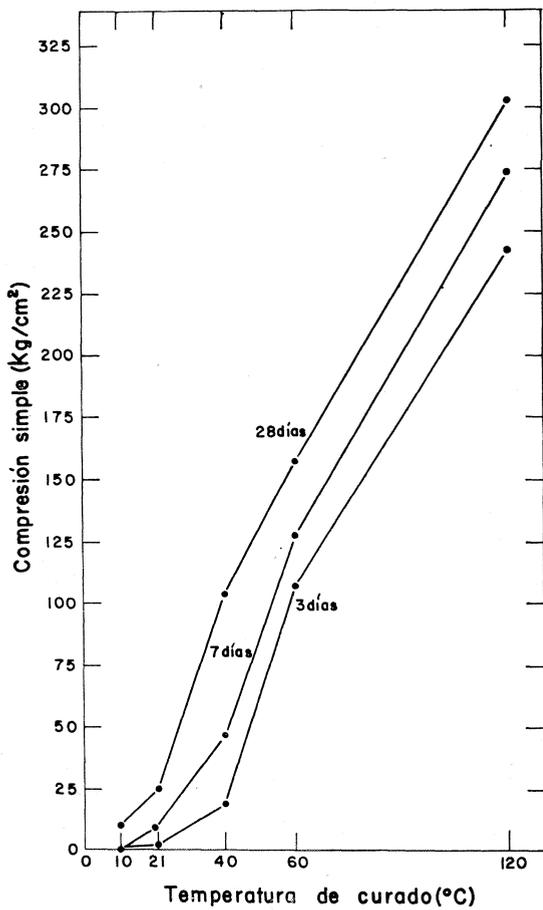


Fig. 5.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal calcítica hidratada y cenizas volantes No. 3.

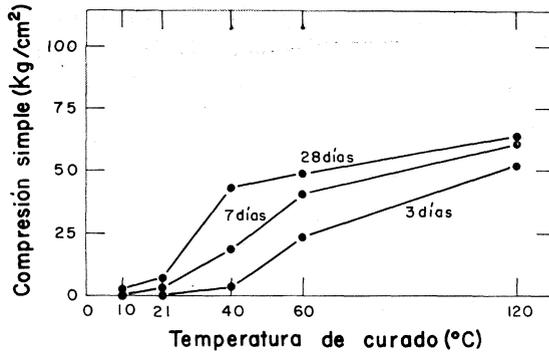


Fig. 7.—Resistencias en función de la temperatura de curado para probetas con cal calcítica hidratada y cenizas volantes No. 4.

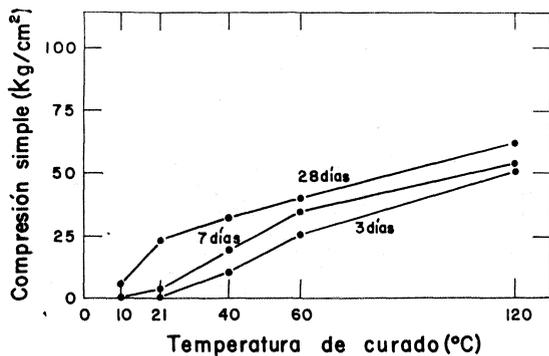


Fig. 8.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal dolomítica monohidratada y cenizas volantes No. 8.

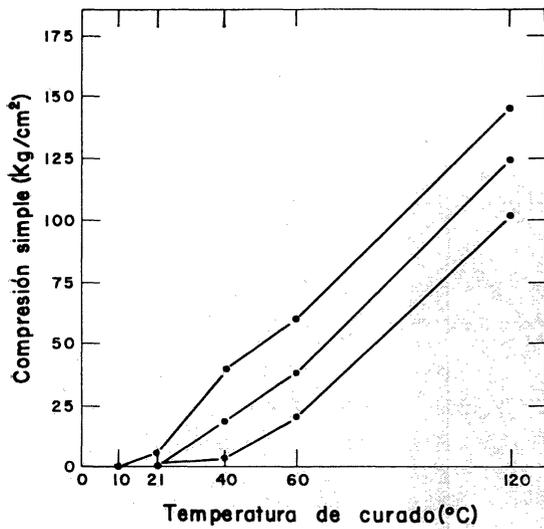


Fig. 9.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal calcítica hidratada y cenizas volantes No. 5.

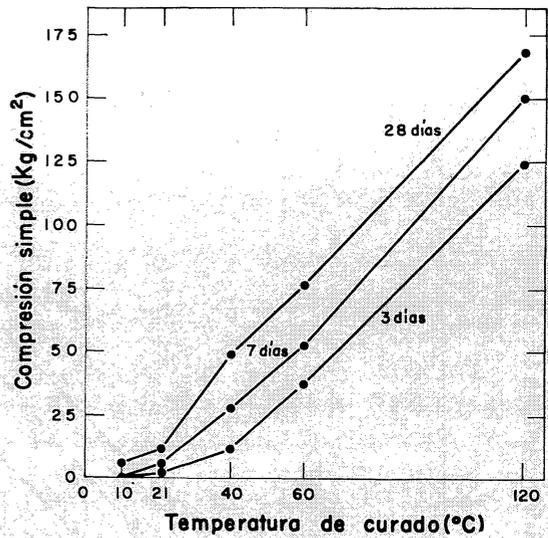


Fig. 12.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal dolomítica monohidratada y cenizas volantes No. 6.

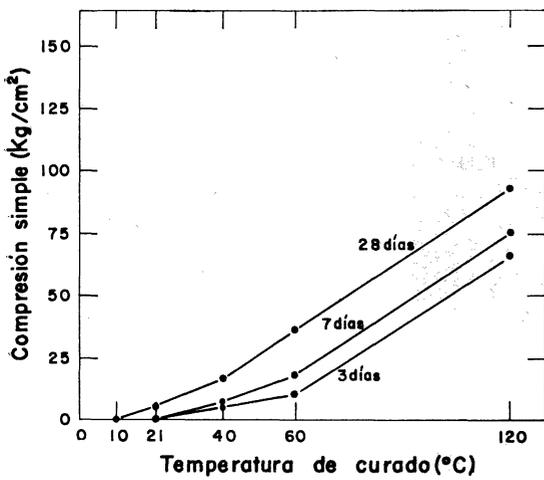


Fig. 10.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal dolomítica monohidratada y cenizas volantes No. 5.

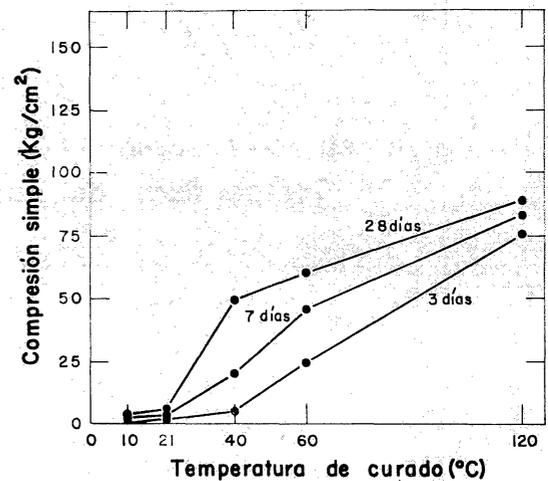


Fig. 13.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal calcítica hidratada y cenizas volantes No. 7.

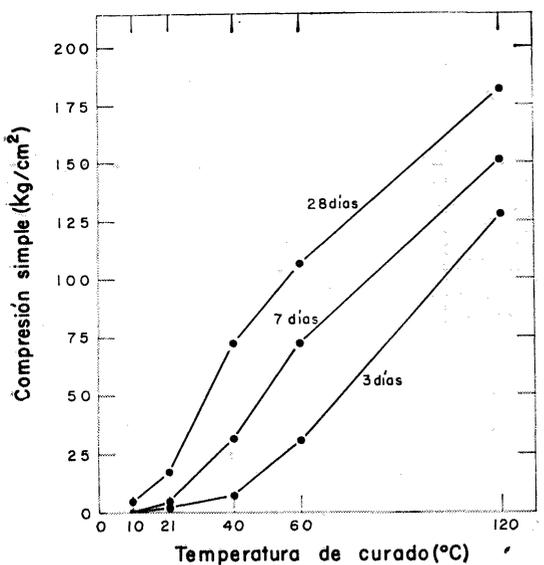


Fig. 11.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal calcítica hidratada y cenizas volantes No. 6.

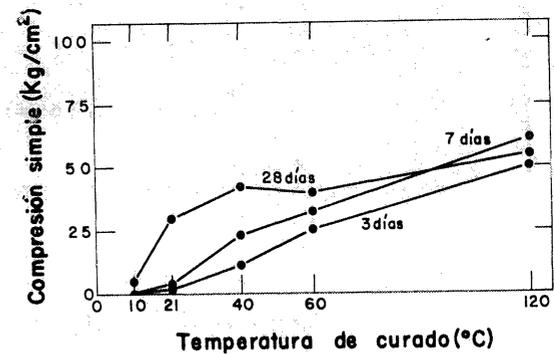


Fig. 14.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal dolomítica monohidratada y cenizas volantes No. 7.

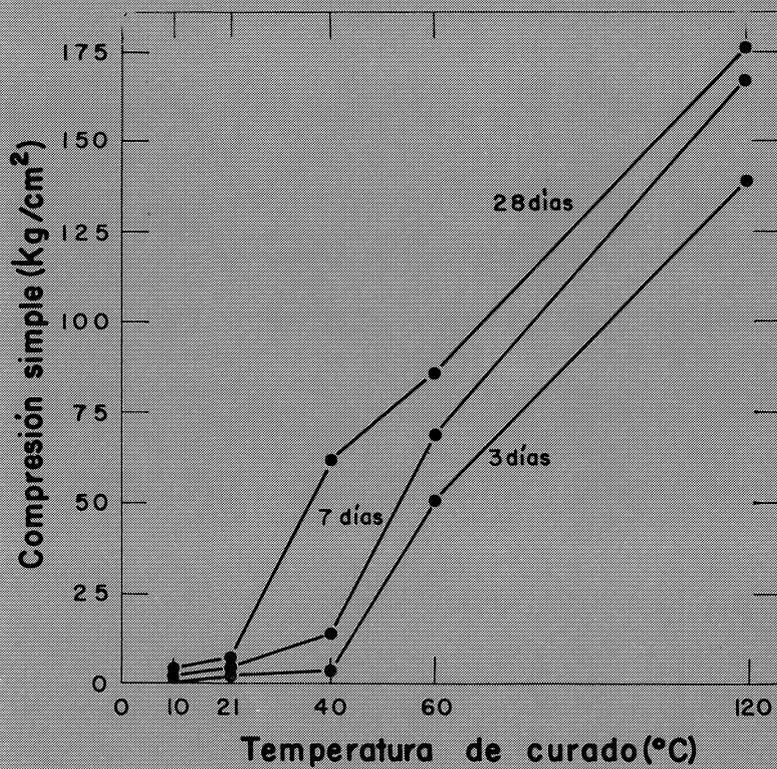


Fig. 15.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal dolomítica monohidratada y cenizas volantes No. 8.

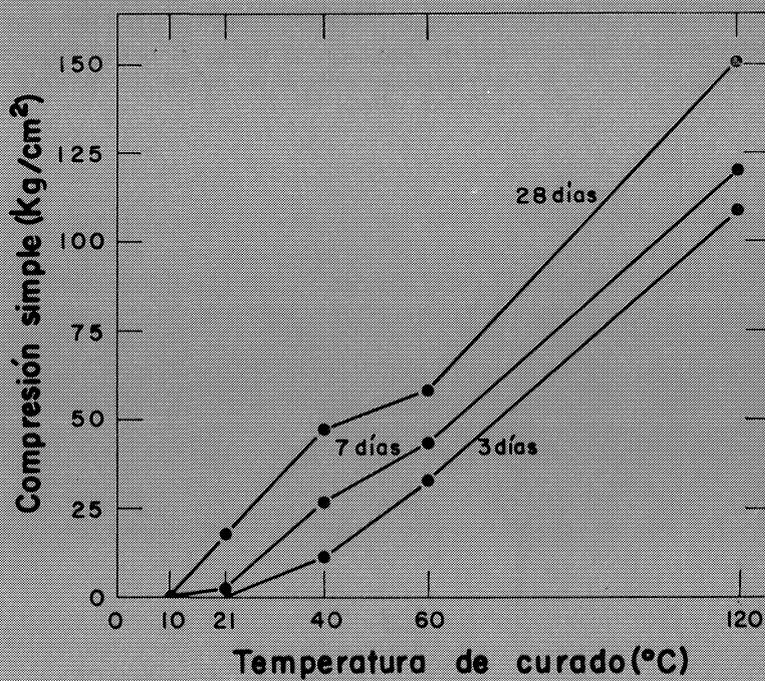


Fig. 16.—Resistencia en función de la temperatura de curado para probetas con cal dolomítica monohidratada y cenizas volantes No. 8.

II Feria Internacional de la Construcción y Obras Públicas - Madrid

Durante los días 13 al 28 del mes de mayo de 1967 se celebrará en Madrid la II Feria Internacional de la Construcción y Obras Públicas, en los modernos pabellones y demás instalaciones de la mundialmente conocida Feria Internacional del Campo, que se encarga de su organización y montaje, a cuyo Certamen quedan invitadas todas las Empresas españolas e internacionales que dedican su actividad a tan importantísima rama de la Economía y de la Producción.

El emplazamiento de este Certamen garantiza, a las industrias que participen y a los futuros visitantes, todas las condiciones necesarias para una Manifestación de auténtica categoría internacional. Por las indudables ventajas de ser Madrid centro geográfico y cruce de comunicaciones, con suficiente capacidad hotelera, siendo además, sede de la Dirección financiera de la mayor parte de las grandes Empresas españolas y de la totalidad de las representaciones diplomáticas y sociales de los diferentes países, queda bien claro el acierto de la elección del escenario que albergará dicha Feria.

Las 13 secciones que van a integrar dicha Exposición Internacional, son las siguientes:

- 1.^a Urbanismo.
- 2.^a Planteamiento de construcciones.
- 3.^a Técnica de la construcción.
- 4.^a Industrias de la construcción.
- 5.^a Maquinaria para la fabricación de materiales y elementos prefabricados.
- 6.^a Materiales de construcción.
- 7.^a Instalaciones especiales.
- 8.^a Aplicaciones de la construcción.
- 9.^a Promoción y mercado de la construcción.
- 10.^a El arte en la construcción.
- 11.^a Arquitectura paisajista.
- 12.^a Exposición bibliográfica.
- 13.^a Concurso fotográfico.

Cabe considerar que esta II Feria Internacional de la Construcción y Obras Públicas podrá ser un importante instrumento de promoción de ventas para aquellas Empresas a quienes interese un marco internacional como allí se les ofrece para la exhibición de sus maquinarias, métodos de producción y planificación, demostrativos de su potencia industrial. Quienes puedan estar interesados en obtener mayor y más completa información, pueden dirigirse a la dirección del Certamen: Avenida de Portugal, s/n. Madrid-11 (España).